



**Pedro Filipe Pereira dos Santos**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

# **Desenvolvimento Experimental e Simulação Numérica em Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre

em Engenharia Mecânica

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira

Arguente: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Vogal: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2014**



---

Desenvolvimento Experimental e Simulação Numérica em Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica

© Pedro Filipe Pereira dos Santos, FCT-UNL, 2014

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





---

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os que me ajudaram no decorrer deste trabalho, de forma profissional e pessoal.

Ao Professor Doutor Telmo Santos, o meu orientador, pelos conhecimentos transmitidos, dedicação demonstrada e acompanhamento ao longo do ano.

Aos professores da FCT-UNL que fizeram parte do meu percurso académico.

Aos técnicos das oficinas do DEMI da FCT, Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães pela ajuda prestada nas várias tarefas de oficina.

Agradeço ao INESC, à Universidade de Aalto, Filândia, e à Godinho Luz, pelo apoio nas simulações.

A todos os colegas e amigos do laboratório de ensaios não destrutivos do DEMI da FCT, que partilharam comigo não só o espaço de trabalho como também os momentos de frustração.

A todos os artistas musicais cujas obras me acompanharam dia após dia durante o trabalho e momentos de lazer.

Ao João, ao Jorge, ao José, ao Paulo e ao Pedro e outros amigos e colegas que me acompanharam e ajudaram a manter a sanidade mental nas alturas mais negras desde o primeiro ao último dia de curso.

Ao meu primo por aturar as minhas atitudes.

À minha avó, à minha mãe e ao meu pai por tudo.



---

## RESUMO

A soldadura por fricção linear (SFL) é um processo de ligação no estado sólido com capacidade para soldar materiais dissimilares e ligas metálicas de baixa soldabilidade. Contudo, nas juntas soldadas com uma configuração topo-a-topo é possível o aparecimento de defeitos na raiz do cordão, nomeadamente, de falta de penetração e de alinhamentos de óxidos. Estes defeitos são responsáveis pela diminuição da resistência mecânica das juntas, sobretudo quando sujeitas a esforços de fadiga. Existem variantes do processo para eliminar este tipo de defeitos, no entanto, verificam-se algumas dificuldades tecnológicas e a competitividade do processo é afetada.

No âmbito deste trabalho desenvolveu-se uma variante do processo designado soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica (SFLAE). Esta variante consiste em introduzir uma corrente elétrica de elevada intensidade na zona da raiz do cordão, por forma a que o calor gerado por efeito de Joule aqueça o material e aumente o fluxo visco-plástico nessa zona, tendo em vista atenuar ou eliminar os defeitos na raiz.

Foram concebidas e produzidas ferramentas de SFL dedicadas, melhorado um modelo analítico do processo, realizadas simulações numéricas para permitir compreender alguns fenómenos físicos envolvidos no processo, e realizados ensaios experimentais de validação.

A análise aos cordões permitiu observar uma diminuição da espessura dos defeitos na raiz em três ensaios realizados na liga AA1100 e AA6084-T6 usando intensidades de corrente de 300 A. Dos resultados de microdureza e de medição de condutividade elétrica é possível concluir que a microestrutura do material não é significativamente alterada pela passagem de corrente elétrica.

## PALAVRAS-CHAVE

Soldadura por Fricção Linear

Defeitos na Raiz

Corrente Elétrica



---

## **ABSTRACT**

Friction stir welding (FSW) is a solid-state joining process able to weld dissimilar materials as well as metallic alloys that otherwise could not be welded with other processes. Despite its advantages, a butt weld created using FSW usually has root defects, such as lack of penetration and oxide alignments, responsible for degrading the mechanical resistance of the weld when subjected to fatigue stresses. There are some processes to eliminate root flaws, but their technological difficulties increase the duration of the process and its cost.

This work tests solutions to this problem developing friction stir welding assisted by Joule effect. This process forces an electrical current to pass through the joint, causing the heat generated by Joule effect to raise the temperature of the root zone and increase the viscoplastic material flow, in order to mitigate or eliminate root defects.

In order to achieve that goal, new tools were developed, a new theoretical model was deduced and numerical simulations were performed to understand some of the physical phenomena involved.

Three distinct welds with smaller defects in the electrical current zone were observed, in AA 1100 and AA 6084-T6. The hardness profile, and electrical conductivity measurement did not display any metallurgic difference between samples welded with and without electrical current. This work allowed to further develop this FSW variant as well as to identify future developments.

## **KEYWORDS**

Friction Stir Welding

Root Defects

Electrical Current



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÍNDICE .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xv
LISTA DE TABELAS .....	xxi
SIGLAS .....	xxiii
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento e Motivação .....	1
1.2 Resumo Alargado .....	2
1.2.1 Objetivos Tecnológicos e Científicos .....	2
1.2.2 Trabalho Realizado .....	2
1.2.3 Estrutura da Dissertação .....	3
2 Revisão do Estado da Arte .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Soldadura por Fricção Linear .....	5
2.2.1 O Processo .....	5
2.2.2 As Ferramentas .....	7
2.2.3 As Variantes .....	9
2.3 Defeitos Típicos .....	10
2.3.1 Introdução .....	10
2.3.2 Diferentes Tipos de Defeitos em Soldadura por Fricção Linear .....	10
2.3.3 Ensaios Não Destrutivos para a Detecção dos Defeitos na Raiz .....	12
2.4 Diferentes Abordagens Tecnológicas de Soldadura por Fricção Linear .....	13
2.4.1 Introdução .....	13
2.4.2 Abordagens Tecnológicas .....	14
2.5 Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica .....	15
2.6 Síntese do Capítulo .....	16

3	Desenvolvimentos Experimentais em Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica.....	19
3.1	Introdução.....	19
3.2	Novas Abordagens Tecnológicas.....	19
3.2.1	Abordagem Tecnológica #1: Pino e <i>shoulder</i> em alumina.....	20
3.2.2	Abordagem Tecnológica #2: Pino em aço e <i>shoulder</i> em alumina.....	23
3.2.3	Abordagem Tecnológica #3: Pino em aço e <i>shoulder</i> em titânio.....	24
3.2.4	Bases de Soldadura .....	27
3.3	Adaptação ao Protótipo Existente .....	29
3.3.1	Equipamento .....	30
3.3.2	Sistema de aquisição de dados .....	30
3.3.3	Sistema de Alimentação.....	31
3.4	Montagem Experimental.....	32
3.5	Síntese do Capítulo .....	33
4	Simulações .....	35
4.1	Introdução.....	35
4.2	Simulação Analítica .....	35
4.3	Simulações Numéricas.....	42
4.3.1	Modelos Desenvolvidos.....	42
4.3.2	Abordagem Tecnológica #1.....	43
4.3.3	Abordagem Tecnológica #2.....	49
4.3.4	Abordagem Tecnológica #3.....	55
4.4	Simulação Híbrida .....	61
4.5	Síntese do Capítulo .....	62
5	Procedimento Experimental .....	65
5.1	Introdução.....	65
5.2	Caraterização do Material Base .....	65
5.3	Parâmetros dos Ensaio Experimentais .....	66
5.3.1	Abordagem Tecnológica #1: Pino e <i>Shoulder</i> em Alumina.....	67
5.3.2	Abordagem Tecnológica #2: Pino em Aço e <i>Shoulder</i> em Alumina .....	67
5.3.3	Abordagem Tecnológica #3: Pino em Aço e <i>Shoulder</i> em Titânio .....	68
5.4	Análise Metalográfica .....	68



5.5	Ensaio de Dureza .....	69
5.6	Ensaio de Medição de condutividade Elétrica.....	69
5.7	Síntese do Capítulo .....	70
6	Resultados e Discussão .....	71
6.1	Introdução.....	71
6.2	Inspeção Visual .....	71
6.3	Análise Metalográfica .....	75
6.4	Ensaio de Dureza .....	83
6.5	Ensaio de Medição de Condutividade Elétrica .....	85
6.6	Síntese do Capítulo .....	87
7	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	89
7.1	Conclusões .....	89
7.2	Desenvolvimentos Futuros .....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
	ANEXOS .....	i
	A.1 Dispersão de corrente elétrica nos modelos numéricos .....	i



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Suporte do motor do Honda Accord de 2013 [4].	1
Figura 2.1 – Pino e <i>shoulder</i> duma ferramenta de SFL.	6
Figura 2.2 – Processo de Soldadura por Fricção Linear, adaptado de [3].	6
Figura 2.3 – Microestrutura de um cordão de uma liga de alumínio soldada por SFL. A – Material base; B – Zona afetada pelo calor; C – Zona termomecanicamente afetada; D – Subzona do nugget [2].	7
Figura 2.4 – Possíveis configurações de juntas. a) Junta topo a topo, b) Junta topo a topo em L, c) Junta topo a topo em T, d) Junta sobreposta, e) Múltiplas juntas sobrepostas, f) Junta sobreposta em T, g) Junta em L [9].	7
Figura 2.5 - Ferramentas de SFL; a cima Flared-Triflute™ e Skew-Stir™; a baixo Trivex™ e MX-Trivex™ [11][12][13].	8
Figura 2.6 – Ferramenta de SSFSW, adaptado de [16].	9
Figura 2.7 - Defeitos em SFL: cavidade e rebarba, adaptado de [19].	10
Figura 2.8 – Secção transversal de um cordão de SFL, adaptado de [21].	11
Figura 2.9 – Micrografia de defeito de falta de penetração na raiz do cordão [24].	12
Figura 2.10 – Ferramenta de SR-FSW. 1 – Material base, 2 – <i>Shoulder</i> superior, 3 – Pino, 4 – <i>Shoulder</i> inferior, 5 – Forças de reação [6].	14
Figura 2.11 – Redução do defeito na raiz do cordão, a) macrografia de amostra sem corrente elétrica, b) macrografia de amostra com intensidade de corrente elétrica de 800 A [31].	15
Figura 2.12 - Micro estrutura de secções transversas de juntas em AA 7075, adaptado de [32].	16
Figura 3.1 – Esquema de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica para a abordagem tecnológica #1.	20
Figura 3.2 – Ferramenta em alumina; a) Perspetiva, b) Desenho Técnico.	21
Figura 3.3 – Fotos das ferramentas em alumina; a) Perfil, b) Vista de planta.	22
Figura 3.4 – Corpo da ferramenta e alma em cobre.	22
Figura 3.5 – Foto do corpo da ferramenta e alma em cobre.	22
Figura 3.6 – Esquema de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica para a abordagem tecnológica #2.	23
Figura 3.7 – Desenho técnico do <i>shoulder</i> de alumina para a ferramenta da AT2.	24
Figura 3.8 – Desenho técnico do pino de aço para as ferramentas das abordagens tecnológicas #2 e #3.	24
Figura 3.9 - Esquema de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica para a abordagem tecnológica #3.	25

Figura 3.10 – Desenho técnico do <i>shoulder</i> para a ferramenta da 3ª abordagem tecnológica. ....	25
Figura 3.11 – Circuito elétrico equivalente à passagem da corrente do pino para a base de soldadura. ....	26
Figura 3.12 – Base de soldadura condutora, em aço, com cobre no eixo de simetria. Dimensões: 300×200×35 mm. ....	27
Figura 3.13 – Base de soldadura isolante, em mármore. Dimensões: 210×210×95 mm. ....	28
Figura 3.14 – Transdutores amperimétricos. À esquerda LEM® HTA 400-s, à direita LEM® LF 1005-s. ....	30
Figura 3.15 - Ambiente do programa em LabVIEW. Zona Azul (A): parâmetros do Ensaio; zona Vermelha (B): parâmetros do equipamento; zona Verde (C): opções de aquisição de dados; zona Amarela (D): gráfico opcional de registo de temperatura; zona Preta (E): gráficos de registo de corrente elétrica e voltagem na ferramenta. ....	31
Figura 3.16 – Esquema geral da montagem. ....	32
Figura 4.1 – Fases de intersecção da alma do cobre com o VC. Em t3 há 100% de intersecção, em t2 e t4 há 39,1% e em t1 e t5 a intersecção é nula. ....	37
Figura 4.2 – Termos de $A_i(d)$ . ....	37
Figura 4.3 – Gráfico da percentagem de área intersectada vs. distância (em raios de circunferência) entre os centros. A 2R a percentagem de intersecção é nula, a R é de 39.1% e quando os centros se sobrepõem é de 100%. ....	38
Figura 4.4 – Volume de controlo no processo de SFL. ....	39
Figura 4.5 – Gráfico das assíntotas da equação 4.14 para o cobre e liga de alumínio de série 6000. Dado que a densidade do cobre é superior à do alumínio, a sua assíntota aparece para um valor maior de intensidade de corrente elétrica. ....	40
Figura 4.6 – Gráfico das variações de temperatura para os dois modelos. Velocidade de avanço de 180 mm/min. ....	40
Figura 4.7 – Gráfico das variações de temperatura para os dois modelos. Velocidade de avanço de 270 mm/min. ....	41
Figura 4.8 – Gráfico da variação de Temperatura vs. Intensidade de Corrente para o novo modelo. Velocidade de avanço de 180 mm/min. ....	41
Figura 4.9 – Gráfico da variação de Temperatura vs. Intensidade de Corrente para o modelo original. Velocidade de avanço de 180 mm/min. ....	41
Figura 4.10 – Detalhe da malha. A zona no retângulo é considerada crítica e possui a malha mais refinada do modelo. ....	42
Figura 4.11 – Modelo geométrico AT1-B1. ....	43
Figura 4.12 – Densidade de corrente em AT1-B1 para valores absolutos. ....	44
Figura 4.13 – Densidade de corrente em AT1-B1, corte em YZ, no eixo de simetria. ...	44
Figura 4.14 – Detalhe da densidade de corrente em AT1-B1, corte em YZ, no eixo de simetria. ....	44

Figura 4.15 – Densidade de corrente em AT1-B1, corte em XY, na superfície da base de soldadura.....	45
Figura 4.16 – Retas consideradas para os gráficos de densidade de corrente nos modelos da AT1. ....	45
Figura 4.17 – Densidade de corrente na vertical para o modelo AT1-B1.....	46
Figura 4.18 – Densidade de corrente na horizontal para o modelo AT1-B1.....	46
Figura 4.19 – Modelo geométrico AT1-B2. ....	47
Figura 4.20 – Densidade de corrente em AT1-B2 para valores absolutos. ....	47
Figura 4.21 – Densidade de corrente em AT1-B2, corte em YZ, no eixo de simetria. ..	47
Figura 4.22 – Detalhe da densidade de corrente em AT1-B2, corte em YZ, no eixo de simetria. ....	48
Figura 4.23 – Densidade de corrente em AT1-B2, corte em XY, na superfície da base de soldadura.....	48
Figura 4.24 – Densidade de corrente na vertical para o modelo AT1-B2.....	48
Figura 4.25 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT1-B2.....	49
Figura 4.26 – Modelo geométrico AT2-B1. ....	50
Figura 4.27 – Densidade de corrente elétrica em AT2-B1 para valores absolutos. ....	50
Figura 4.28 – Densidade de corrente elétrica em AT2-B1, corte em YZ. ....	50
Figura 4.29 – Detalhe da densidade de corrente elétrica em AT2-B1, corte em YZ. ....	51
Figura 4.30 – Densidade de corrente em AT2-B1, corte no eixo XY.....	51
Figura 4.31 – Retas consideradas para os gráficos de densidade de corrente da AT2.....	51
Figura 4.32 – Densidade de corrente elétrica na vertical para o modelo AT2-B1.....	52
Figura 4.33 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT2-B1.....	52
Figura 4.34 – Modelo geométrico AT2-B2. ....	53
Figura 4.35 – Densidade de corrente em AT2-B2 para valores absolutos. ....	53
Figura 4.36 – Densidade de corrente em AT2-B2, corte em YZ, no eixo de simetria. ..	53
Figura 4.37 – Detalhe da densidade de corrente em AT2-B2, corte em YZ, no eixo de simetria. ....	54
Figura 4.38 – Densidade de corrente em AT2-B2, corte em XY.....	54
Figura 4.39 – Densidade de corrente na vertical para o modelo AT2-B2.....	54
Figura 4.40 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT2-B2.....	55
Figura 4.41 – Modelo geométrico de AT3-B1. ....	56
Figura 4.42 – Densidade de corrente em AT3-B1 para valores absolutos. ....	56
Figura 4.43 – Densidade de corrente em AT3-B1, corte em YZ.....	56
Figura 4.44 – Detalhe da densidade de corrente elétrica em AT3-B1, corte em YZ. ....	57
Figura 4.45 – Densidade de corrente em AT3-B1, corte em XY.....	57
Figura 4.46 – Retas consideradas para os gráficos de densidade de corrente nos modelos da AT3. ....	57
Figura 4.47 – Densidade de corrente elétrica na vertical para o modelo AT3-B1.....	58
Figura 4.48 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT3-B1.....	58

Figura 4.49 – Modelo geométrico AT3-B2. ....	59
Figura 4.50 – Densidade da corrente elétrica de AT3-B2, em valores absolutos.....	59
Figura 4.51 – Densidade da corrente elétrica de AT3-B2, corte em YZ. ....	59
Figura 4.52 – Detalhe da densidade de corrente elétrica de AT3-B2, corte em YZ. ....	60
Figura 4.53 – Densidade da corrente elétrica de AT3-B3, corte em XY. ....	60
Figura 4.54 – Densidade de corrente elétrica na vertical para o modelo AT3-B2. ....	60
Figura 4.55 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT3-B2. ....	61
Figura 4.56 – Gráficos de Intensidade de corrente e variação de temperatura para a AT1.	
O tracejado delimita a zona de MB entre o pino e a base de soldadura .....	62
Figura 6.1 – Soldadura do ensaio #3 e gráfico de corrente elétrica. ....	71
Figura 6.2 – Soldadura do ensaio #5 e gráfico de corrente elétrica. ....	72
Figura 6.3 – Soldadura do ensaio #6 e gráfico de corrente elétrica. ....	72
Figura 6.4 – Soldadura do ensaio #8, gráfico de corrente elétrica e de aumento de temperatura nos termopares. ....	73
Figura 6.5 – Soldadura do ensaio #10 e gráfico de corrente elétrica. ....	73
Figura 6.6 – Soldadura do ensaio #3 e gráfico de corrente elétrica. ....	74
Figura 6.7 – Soldadura do ensaio #12, gráfico de corrente elétrica e aumento de temperatura nos termopares. ....	75
Figura 6.8 – Macrografia da secção transversal do ensaio #3 (AT1-B1), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M1, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M3, com destaque da falta de mistura do material base, d) Macrografia da amostra M3, em zona de aplicação de corrente elétrica. ....	76
Figura 6.9 – Macrografia do ensaio #3 (AT1-B1), a) Amostra M4, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M4, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M5, com destaque da falta de mistura do material base, d) Amostra M5, em zona sem passagem de corrente. ....	76
Figura 6.10 – Macrografia do ensaio #10 (AT1-B1), a) Amostra M2, com $I=0$ A, b) Pormenor do defeito na raiz de M2, destaque da falta de mistura do MB (azul) e alinhamento de óxidos (verde), c) Pormenor do defeito na raiz de M3, destaque da falta de mistura do MB (azul) e alinhamento de óxidos (verde), d) Amostra M3, em ZACE. ....	77
Figura 6.11 – Macrografia do ensaio #10 (AT1-B1), a) Amostra M5, com $I = 0$ A, b) Pormenor do defeito na raiz de M5, destaque do início da propagação do <i>wormhole</i> , c) Pormenor do defeito na raiz de M6, destaque da propagação do <i>wormhole</i> , d) Amostra M6, com $I=0$ A..	77
Figura 6.12 – Macrografia da secção transversal do ensaio #11 (AT1-B2), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M1, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M2, com destaque da falta de mistura do material base, d) Macrografia da amostra M2, em ZACE. ....	78

Figura 6.13 - Macrografia do ensaio #11 (AT1-B2), a) Amostra M3, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M3, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M4, com destaque da falta de mistura do material base (azul) e alinhamento de óxidos (verde), d) Macrografia da amostra M4, com I=0 A. ....	78
Figura 6.14 – Ferramenta de alumina da AT1, a) antes do ensaio #3, b) após a soldadura. ....	79
Figura 6.15 – Macrografia da secção transversal do ensaio #5 (AT2-B1), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul). ....	79
Figura 6.16 – Macrografia do ensaio #5, a) Amostra M2, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul). ....	80
Figura 6.17 – Macrografia do ensaio #5, a) Amostra M5, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul). ....	80
Figura 6.18 – Macrografia da secção transversal do ensaio #6 (AT2-B1), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul). ....	81
Figura 6.19 – Macrografia do ensaio #6 (AT2-B1), a) Amostra M2, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos. ....	81
Figura 6.20 – Macrografia do ensaio #6 (AT2-B1), a) Amostra M3, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos. ....	82
Figura 6.21 – Macrografia da secção transversal do ensaio #12 (AT1-B2), a) Macrografia da amostra M4, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul). ....	82
Figura 6.22 – Perfis de dureza do ensaio #8, a) Perfis de dureza da amostra M1, com I=0 A, b) Perfis de dureza da amostra M3, com I=300 A. ....	83
Figura 6.23 – Perfis de dureza do ensaio #12, a) Perfis de dureza da amostra M1, com I=0 A, b) Perfis de dureza da amostra M3, com I=290 A. ....	84
Figura 6.24 - Perfis de dureza do ensaio #8. Comparação entre durezas das amostras M1 e M3, a 1,125mm da raiz da junta. ....	84
Figura 6.25 - Perfis de dureza do ensaio #8. Comparação entre durezas das amostras M1 e M3, a 0,250mm da raiz da junta. ....	85
Figura 6.26 – Perfis de condutividade elétrica de M1 do ensaio #3 para duas frequências de sonda diferentes. ....	85
Figura 6.27 – Perfis de condutividade elétrica das amostras M1 (a) e M3 (b), do ensaio #8, para duas frequências diferentes. ....	86
Figura 6.28 – Perfis de condutividade elétrica das amostras M1 (a) e M3 (b), do ensaio #12, para duas frequências diferentes. ....	87
Figura A.0.1 – Distribuição da corrente elétrica em AT1-B1. ....	i

Figura A.0.2 – Distribuição da corrente elétrica em AT1-B2.....	i
Figura A.0.3 – Distribuição da Corrente Elétrica do modelo AT2-B1.....	i
Figura A.0.4 – Distribuição da corrente elétrica em AT2-B2.....	ii
Figura A.0.5 – Distribuição da corrente elétrica em AT3-B1.....	ii
Figura A.0.6 – Distribuição da corrente elétrica em AT3-B2.....	ii



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Terminologia de um cordão soldado por fricção linear. ....	11
Tabela 3.1 – Requisitos funcionais das ferramentas desenvolvidas. ....	20
Tabela 3.2 – Resistividade elétrica em $\Omega.m$ e condutividade elétrica em S/m e % IACs [33].....	21
Tabela 3.3 – Resistividade elétrica e área em contacto com o MB para o pino e <i>shoulder</i> . .....	26
Tabela 3.4 – Requisitos funcionais da base de soldadura isolante. ....	28
Tabela 3.5 – Propriedades dos materiais das bases de soldadura [33]. ....	29
Tabela 3.6 – Combinações Possíveis nos Ensaio Experimentais .....	29
Tabela 4.1 – Parâmetros comuns do modelo teórico .....	35
Tabela 4.2 – Propriedades do cobre e ligas de alumínio a 25°C [33]......	39
Tabela 4.3 - Detalhes do modelo geométrico AT1-B1. ....	43
Tabela 4.4 – Detalhes do modelo geométrico AT1-B2. ....	46
Tabela 4.5 - Detalhes do modelo geométrico AT2-B1 .....	49
Tabela 4.6 – Detalhes do modelo geométrico AT2-B2 .....	52
Tabela 4.7 – Detalhes do modelo geométrico AT3-B1. ....	55
Tabela 4.8 – Detalhes do modelo geométrico AT3-B2. ....	58
Tabela 5.1 – Dimensões de chapas usadas. ....	65
Tabela 5.2 – Composição química da liga AA 1100 em percentagem [33]. ....	65
Tabela 5.3 – Composição química da liga AA 6082-T6 em percentagem [33]. ....	65
Tabela 5.4 – Ensaio experimentais realizados em SLFAE .....	66
Tabela 5.5 – Esquema dos ensaios de SFLAE.....	66
Tabela 5.6 – Ensaio experimentais com a abordagem tecnológica #1 .....	67
Tabela 5.7 – Ensaio experimentais com a abordagem tecnológica #2.....	68
Tabela 5.8 – Ensaio experimentais da abordagem tecnológica #3.....	68
Tabela 5.9 – Amostras por ensaio experimental analisado .....	69
Tabela 5.10 – Composição química, em percentagem, do reagente de Keller .....	69
Tabela 5.11 – Parâmetros de teste utilizados nos ensaios de CI. ....	70



## SIGLAS

AA	<i>Aluminum Alloy</i>
AT1	Abordagem Tecnológica #1
AT2	Abordagem Tecnológica #2
AT3	Abordagem Tecnológica #3
FSSW	<i>Friction Stir Spot Welding</i>
LoP	<i>Lack of Penetration</i>
MB	Material Base
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
SFL	Soldadura por Fricção Linear
SFLAE	Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica
SR-FSW	<i>Self-Reacting Friction Stir Welding</i>
SSFSW	<i>Stationary Shoulder Friction Stir Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
VC	Volume de Controlo
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZACE	Zona de Aplicação de Corrente Elétrica
ZTMA	Zona Termomecanicamente afetada



---

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A Soldadura por Fricção Linear é um processo de soldadura a frio desenvolvido em 1991 pelo The Welding Institute [1]. Desde a sua génese, o processo tem sido frequentemente estudado nos meios académicos e industrial devido à sua fácil aplicação e, principalmente, à sua capacidade de soldar ligas de alumínio, cobre, titânio e magnésio, assim como várias ligas de aço, dificilmente soldáveis por outros processos [1,2]. Outras vantagens da SFL são a criação de juntas soldadas com boas propriedades mecânicas, facilidade de adaptação à tecnologia já existente, ausência de consumíveis e baixo consumo energético em comparação com outros processos de soldadura. As desvantagens mais graves são o aparecimento de defeitos na raiz do cordão, o a duração do processo e necessidade de operações de maquinaria pós-soldadura [1-3].

As características atrativas da SFL deram alta relevância a este processo nas indústrias dos transportes. Na indústria aeroespacial, a NASA conseguiu reduzir o peso do tanque de combustível externo do *space shuttle* em 3.4 toneladas, soldando ligas Al-Li 2195 por SFL em vez de ligas de alumínio Al 2219 com *variable polarity plasma arc welding* [3]. Na indústria automóvel são vários os casos onde se vêem SFL e a sua vertente *friction stir spot welding* aplicados na produção em massa; o Honda Accord tem o suporte do motor, ilustrado na Figura 1.1, em liga de alumínio soldada a aço por SFL, reduzindo o peso final do veículo em 25% [4] e outras marcas como a Mazda, Ford, Audi, Mercedes e BMW também exploram esta tecnologia [3].

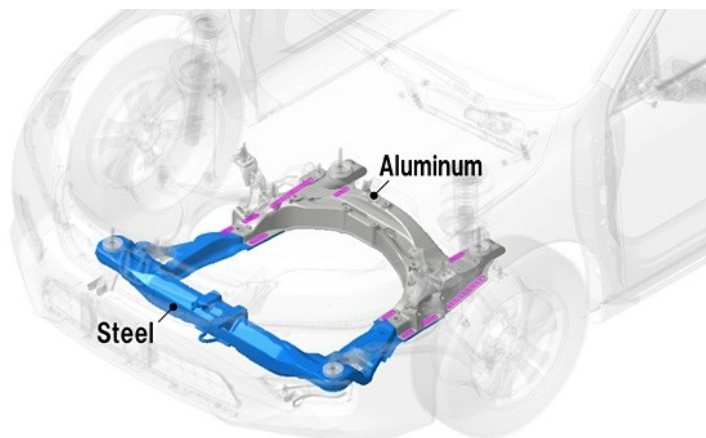


Figura 1.1 - Suporte do motor do Honda Accord de 2013 [4].

Os defeitos na raiz do cordão de soldadura, gerados pela falta de penetração do pino e consequente falta de amaciamento do material dessa zona, são os mais graves pois comprometem a estrutura [3]. Os métodos de eliminação do defeito, tal como o uso de uma espessura de sacrifício destinada a ser maquinada para remover toda a zona onde o defeito está

presente, aumentam a duração e o custo do processo de fabrico. Outra solução é a utilização da vertente *self-reacting friction stir welding*, mas apresenta limitações ao nível de juntas possíveis de soldar [5,6]. É devido ao problema dos defeitos na raiz dos cordões de SFL que se deu início ao estudo da Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica, no Núcleo de Tecnologia Industrial da FCT-UNL, que tinha como propósito obter cordões de soldadura com defeitos na raiz menores ou, idealmente, inexistentes utilizando apenas o processo em desenvolvimento. Devido à aparente ineficácia da corrente elétrica na redução do defeito, propõe-se nesta dissertação dar continuidade ao estudo através do desenvolvimento de novas abordagens ao processo que aumentem a densidade de corrente elétrica na zona do defeito da raiz do cordão, na tentativa de diminuir ou elimina-lo.

## **1.2 Resumo Alargado**

### **1.2.1 Objetivos Tecnológicos e Científicos**

O objetivo principal deste trabalho é a remoção dos defeitos na raiz do cordão de juntas soldadas por soldadura por fricção linear. Para esse efeito, continua-se o desenvolvimento do processo de SFL assistido por corrente elétrica, iniciado no NTI, em 2013, por Henrique Costa [7].

Para aumentar o conhecimento processual e fenomenológico desta variante do processo de SFL, desenvolveram-se várias alternativas de abordagens tecnológicas de SFLAE, baseadas em protótipos criados no NTI. Vários parâmetros e material base foram ensaiados com estes métodos de soldadura. Um modelo analítico e várias simulações numéricas das abordagens tecnológicas propostas acompanham este estudo.

### **1.2.2 Trabalho Realizado**

Para atingir os objetivos estabelecidos, o trabalho foi iniciado com uma pesquisa bibliográfica do processo e suas variantes com especial foco nos defeitos na raiz do cordão.

Com base no trabalho anteriormente desenvolvido no NTI, foi revisto um modelo analítico simplificativo para quantificar o aumento de temperatura por efeito de Joule para o processo de SFL assistida.

Foram desenvolvidas várias ferramentas com materiais de diversas resistividades e geometrias. Nas abordagens tecnológicas utilizaram-se combinações de *shoulder* e pino

distintas, que variaram desde uma ferramenta de soldadura por fricção linear tradicional a ferramentas de materiais pouco comuns neste processo de ligação, como a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Para compreender os fenómenos físicos envolvidos e prever resultados desta vertente de SFL, foram efetuadas simulações analíticas, com base no modelo referido, e numéricas, usando o *software* de elementos finitos CST Studio.

As ferramentas foram usadas para a realização dos ensaios experimentais, com variação dos seus parâmetros de soldadura. Após os ensaios, foi feita a análise dos cordões soldados, através de uma análise metalográfica, ensaios de dureza e medição de condutividade elétrica, para medir a eficácia do aumento de temperatura causada por resistência elétrica na remoção, ou atenuação dos defeitos na raiz do cordão.

### 1.2.3 Estrutura da Dissertação

Este documento é estruturado em sete capítulos.

O capítulo 2 compila a pesquisa bibliográfica sobre o processo de soldadura por fricção linear, as variantes do processo e os defeitos típicos associados à tecnologia.

O capítulo 3 explica as novas abordagens tecnológicas utilizadas no desenvolvimento experimental da soldadura por fricção linear. Descreve a criação dos protótipos das ferramentas de SFLAE, do material auxiliar ao processo e a escolha das fontes de corrente elétrica. O capítulo encerra com a descrição das montagens experimentais.

O capítulo 4 descreve o raciocínio por trás do no modelo analítico deduzido, expõe as simulações numéricas efetuadas e justifica a simplificação dos modelos geométricos utilizados.

O capítulo 5 relata os procedimentos experimentais seguidos para produzir os cordões de SFLAE. Os métodos de avaliação dos cordões também são abordados.

O capítulo 6 analisa e discute os resultados experimentais, através da inspeção visual, análise metalográfica, ensaios de dureza e medição de condutividade elétrica das amostras dos cordões de soldadura.

O capítulo 7 apresenta as conclusões retiradas deste estudo e sugestões para a sua continuação.





---

## 2 Revisão do Estado da Arte

### 2.1 Introdução

Este capítulo compila a informação da pesquisa bibliográfica sobre o processo de soldadura por fricção linear. No § 2.2 abordam-se as características principais do processo, as suas ferramentas tradicionais e novas variantes de SFL. No § 2.3 aprofunda-se a pesquisa sobre defeitos na raiz do cordão de soldadura e no § 2.4 referem-se algumas metodologias para eliminação deste tipo de defeitos. Por fim, no § 2.5 resume-se o trabalho existente sobre a soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica.

### 2.2 Soldadura por Fricção Linear

#### 2.2.1 O Processo

Desde a sua conceção, a soldadura por fricção linear tem vindo a ser tema de estudo no meio académico e industrial devido principalmente à sua capacidade de soldar materiais que processos de soldadura por fusão não conseguem, tais como as ligas de alumínio AA 7XXX e algumas AA 2XXX. Em pouco mais de 20 anos, desenvolveram-se ferramentas, estudaram-se os fenómenos físicos envolvidos e criaram-se novos processos baseados em SFL.

A SFL é um processo de soldadura em estado sólido, que utiliza o calor gerado pela fricção entre uma ferramenta e o material base para amacia-lo e formar um cordão de soldadura, sem atingir a temperatura de fusão do material. Desta forma, a peça produzida apresenta menos problemas relacionados com a resolidificação, porosidades, aumento da fragilidade, fissuração e ainda tem uma redução das tensões e distorções residuais na junta soldada [3].

A ferramenta gira em torno do seu eixo e avança segundo a direção de soldadura. É tipicamente constituída por um pino, que penetra e mistura o material, e um *shoulder*, que entra em contacto com a superfície do material base, gerando calor por atrito quando o pino entra no MB na totalidade. Uma ferramenta típica de SFL é ilustrada pela Figura 2.1 e a Figura 2.2 representa o processo em funcionamento. O cordão produzido tem um relevo que descreve semicircunferências e, dependendo das especificações finais, pode não requerer retificação. Estudos sugerem que uma rotação da ferramenta provoca a extrusão de uma camada laminar de material cilíndrico e esse deslocamento de material causa o aparecimento das semicircunferências [8].

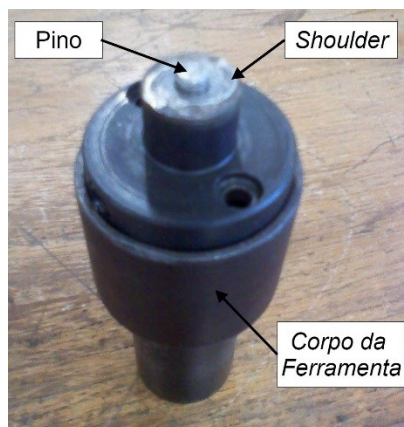


Figura 2.1 – Pino e *shoulder* duma ferramenta de SFL.

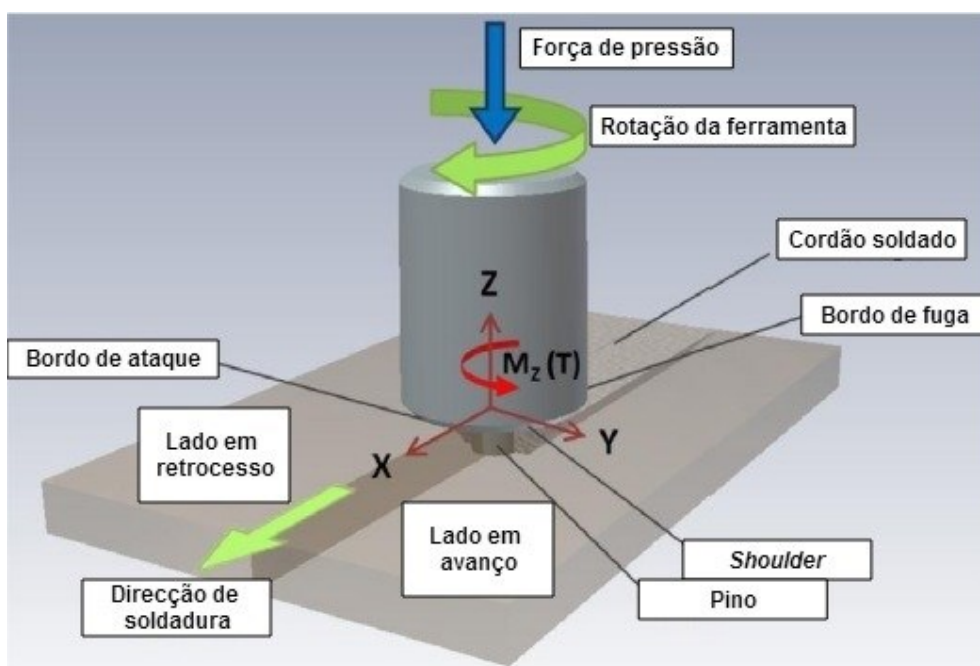


Figura 2.2 – Processo de Soldadura por Fricção Linear, adaptado de [3].

A microestrutura de uma junta soldada por fricção linear apresenta três zonas distintas. Uma zona não afetada pelo calor da ferramenta representa as áreas do MB que não sofrem alterações, mesmo passando por um ciclo térmico. A zona afetada pelo calor passa por um ciclo térmico que altera a sua microestrutura e, por vezes, também algumas propriedades mecânicas. Não ocorre deformação plástica nesta área. Por último, na zona termomecanicamente afetada, o material sofre deformação plástica e passa por um ciclo térmico. O material nesta zona é recristalizado, exceto nas ligas de alumínio que têm um comportamento diferente. Para estas, a ZTMA não é totalmente recristalizada e apresenta uma subzona especial, o *nugget*, onde todo o material é recristalizado [2,3,9]. Estas zonas são representadas na Figura 2.3.

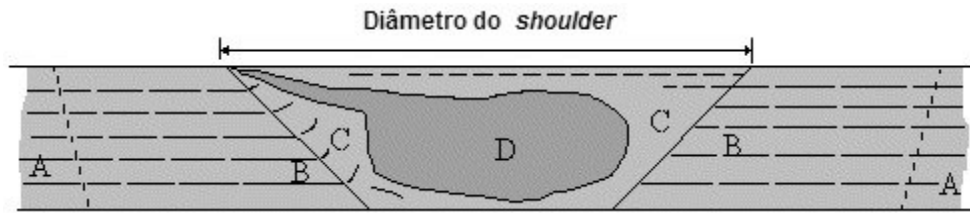


Figura 2.3 – Microestrutura de um cordão de uma liga de alumínio soldada por SFL. A – Material base; B – Zona afetada pelo calor; C – Zona termomecanicamente afetada; D – Subzona do nugget [2].

Normalmente, a SFL é usada para soldar juntas topo a topo ou sobrepostas, mas também pode realizar soldadura de canos, hemisféricas, múltiplas juntas sobrepostas, em duplo T e de canto em L. A Figura 2.4 ilustra algumas configurações de juntas. A SFL não requer muita preparação das juntas a soldar e tolera camadas de óxidos finas. No entanto, seja qual for a configuração da junta, é sempre necessária boa fixação dos materiais a soldar para garantir um alinhamento correto. Isto tem como consequência o aumento do tempo de preparação do processo, tornando-o menos produtivo e mais caro [3]. Outro fator que encarece o processo é a eventual necessidade de maquinar o material na zona à saída do pino, já que no fim do processo o pino deixa uma zona sem material.

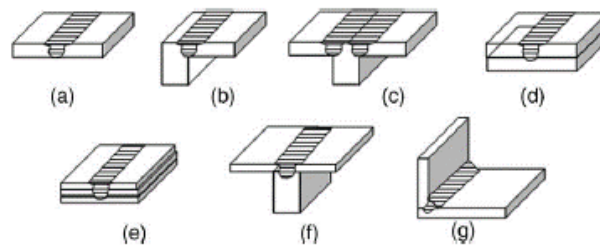


Figura 2.4 – Possíveis configurações de juntas. a) Junta topo a topo, b) Junta topo a topo em L, c) Junta topo a topo em T, d) Junta sobreposta, e) Múltiplas juntas sobrepostas, f) Junta sobreposta em T, g) Junta em L [9].

Os parâmetros principais que influenciam o processo de soldadura por fricção linear são: geometria do pino e *shoulder* (isto é, comprimento, diâmetro, ângulo de inclinação do pino, relevo), velocidades de rotação e de avanço e força de pressão.

## 2.2.2 As Ferramentas

O pino e o *shoulder* das ferramentas de SFL são responsáveis por gerar calor, misturar o material, dispersar camadas de óxidos, criar pressão de forjamento, conter o material na junta (evitando a rebarba) e prevenir, ou reduzir ao máximo o aparecimento de defeitos no cordão [3].

A geometria da ferramenta de SFL evoluiu desde as primeiras soldaduras com pinos cilíndricos com ou sem rosca e *shoulders* lisos. Alterando alguns parâmetros da geometria, como

por exemplo o ângulo do pino (cujo aumento provoca um aumento de temperatura [10]) foram criadas geometrias mais complexas, desenvolvidas com várias melhorias em mente. Um exemplo disto são as ferramentas Flared-Triflute™ e Skew-Stir™, que aumentam a disrupção das camadas de óxidos à superfície do MB e expandem a largura da ZTMA, ou as Trivex™ e MX-Trivex™, que reduzem as forças envolvidas no processo [3,11-13]. Estas ferramentas estão representadas na Figura 2.5. A evolução das ferramentas também cria novas vertentes do processo.

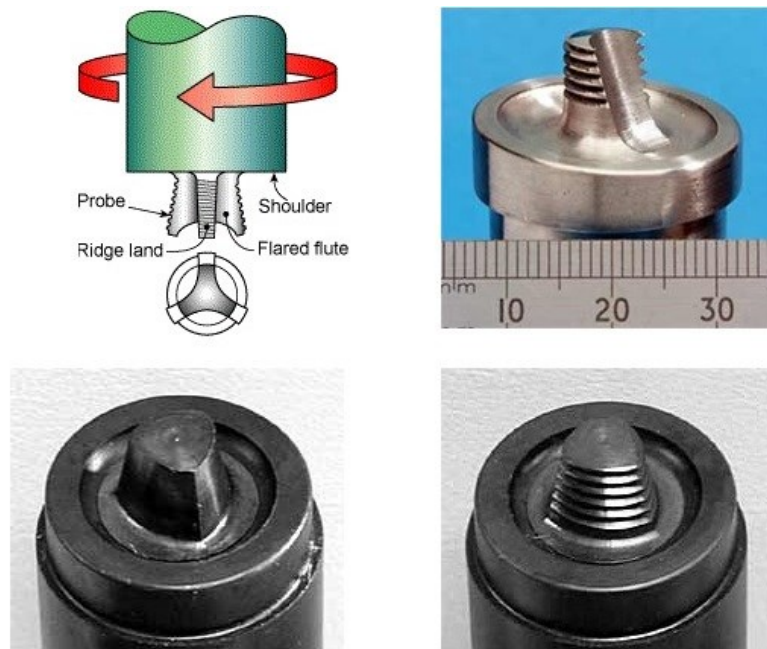


Figura 2.5 - Ferramentas de SFL; a cima Flared-Triflute™ e Skew-Stir™; a baixo Trivex™ e MX-Trivex™ [11][12][13].

Apesar da SFL convencional não ter consumíveis, o desgaste das ferramentas passou a ser uma preocupação quando começou a ser usada para soldar materiais com maior dureza e temperatura de fusão, tais como o titânio, “superligas” à base de níquel e MMCs (*metal matrix composites*), impulsionando os avanços nos materiais usados nas ferramentas para combater os efeitos do desgaste [3]. Outra forma de combater o desgaste na ferramenta é pré-aquecer o material base antes ou durante a soldadura [3,10,14]. Além de afetar a durabilidade da ferramenta, o desgaste também é prejudicial à junta soldada, visto que pode ser responsável por causar fraca homogeneidade na sua microestrutura, contaminando o MB durante o processo [15]. A longo prazo, também pode causar a alteração dos parâmetros do processo, já que a geometria da ferramenta vai-se degradando (por exemplo, com redução do comprimento e diâmetro do pino).

### 2.2.3 As Variantes

As novas morfologias de ferramentas que foram surgindo ao longo da maturidade do processo para eliminar ou atenuar algumas das suas limitações e substituir outros processos de fabrico, geraram várias variantes da SFL. Apresentam-se algumas das suas variantes.

O *stationary shoulder friction stir welding* foi desenvolvido para soldar ligas de titânio, que devido à temperatura elevada necessária para soldar por fricção linear e a sua baixa condutividade, atinge altas temperaturas à superfície, dando origem a problemas na junta como excesso de rebarba e aparecimento de cavidades. Em SSFSW o pino gira em torno do seu eixo e o *shoulder* não tem qualquer rotação, exercendo apenas força de pressão sobre a peça. Uma ferramenta típica é ilustrada pela Figura 2.6. A maioria do calor é gerado pelo pino, dando origem a uma junta com *input* de calor praticamente linear, ZAC reduzida e acabamento superficial liso [16]. Consegue soldar juntas topo a topo, de canto e em T [3].

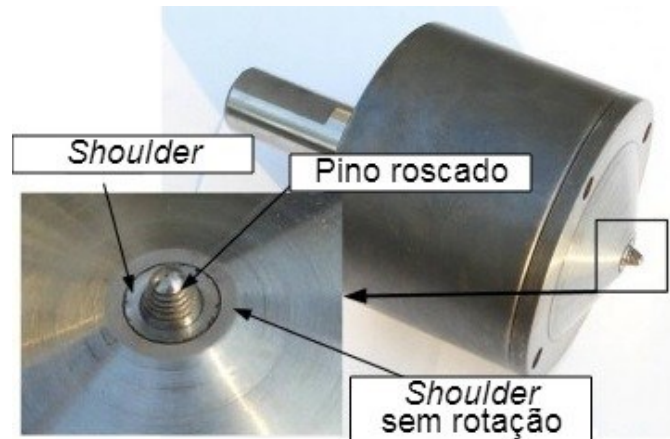


Figura 2.6 – Ferramenta de SSFSW, adaptado de [16].

A *friction stir spot welding* é uma nova aplicação que usa uma ferramenta semelhante à de SFL, mas em vez de formar um cordão de soldadura ao longo de uma junta, esta solda apenas alguns pontos, mergulhando e removendo de seguida a ferramenta no material base. A sua aplicação principal é na soldadura de ligas de alumínio, realizando soldas que a soldadura por pontos não é capaz, devido à elevada condutividade térmica destas ligas metálicas [3]. Outra vantagem atrativa é a redução do consumo energético em 99% [17] e redução do custo de instalação em 40%, comparando com a soldadura por pontos [17,18].

A *bobbin tool* é uma ferramenta com dois *shoulders* e um pino que atravessa totalmente o material, usada em *self-reacting friction stir welding*. Este processo é explorado mais adiante, em § 2.4.2, devido à sua importância como processo capaz de eliminar os defeitos na raiz do cordão.

## 2.3 Defeitos Típicos

### 2.3.1 Introdução

Num processo que se move linearmente e a velocidade constante ao longo da junta a soldar, o cordão tem tendência a criar defeitos que se propagam pelo comprimento do mesmo, dado o caráter estacionário do processo. Os defeitos mais comuns em SFL são o excesso de rebarba, excesso de concavidade, inclusão de partículas, vazios, *wormholes*, faltas de penetração e alinhamentos de óxidos. Estes podem ser classificados como inclusões, defeitos volumétricos ou laminares e ainda como exteriores ou interiores [3].

### 2.3.2 Diferentes Tipos de Defeitos em Soldadura por Fricção Linear

Rebarba em excesso é criada quando a ferramenta penetra o material em demasia. Também pode resultar da maquinação incorreta do material base ou de parâmetros de soldadura inadequados. Este excesso também pode dar origem a um cordão côncavo indesejável [3].

O desgaste das ferramentas pode causar defeitos no cordão devido à mudança na sua geometria, que altera os parâmetros do processo, e por contaminar o cordão com inclusões [3].

Vazios e *wormholes* são causados por falta de pressão de forjamento, velocidade de avanço excessiva e *design* inapropriado da ferramenta ou avançado estado de desgaste da mesma. Um *wormhole*, ou canal é um vazio que se propaga no comprimento da junta. Estes defeitos podem ser interiores ou exteriores e são os defeitos mais comuns em SFL [3,9].

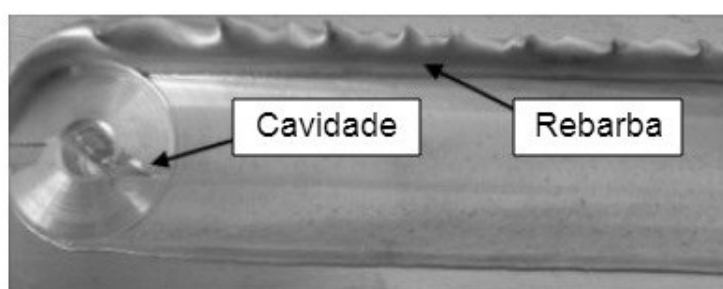


Figura 2.7 - Defeitos em SFL: cavidade e rebarba, adaptado de [19].

O foco desta dissertação é a eliminação ou redução dos defeitos na raiz do cordão. A Figura 2.8 apresenta estes defeitos e a

Tabela 2.1 esclarece a sua terminologia. Os defeitos na raiz do cordão são caracterizados como defeitos externos, presentes na face do material oposta à ferramenta. Provocam o detrimento de propriedades mecânicas da junta, principalmente a resistência à fadiga, e são de difícil deteção por meio de ensaios não destrutivos, devido à sua geometria

estreita e baixo volume. São a propagação de defeitos internos como alinhamento de óxidos, faltas de penetração e faltas de consolidação [3,20]. É do interesse deste trabalho evitar ou atenuar estes defeitos.

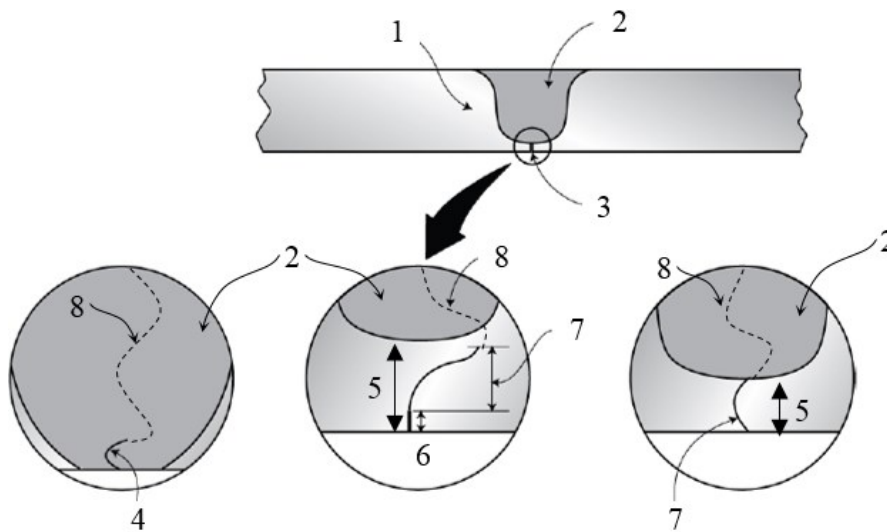


Figura 2.8 – Seção transversal de um cordão de SFL, adaptado de [21].

Tabela 2.1 – Terminologia de um cordão soldado por fricção linear.

Nº	Terminologia	Notas
1	Material Base	
2	Nugget	Zona onde ocorre recristalização
3	Defeito na Raiz	Originado por fraco fluxo visco-plástico na zona da raiz
4	Defeito na Raiz: alinhamento de óxidos	O alinhamento de óxidos permanece no <i>nugget</i> apesar da recristalização
5	Defeito na Raiz: Falta de Penetração	Falta de penetração do pino da ferramenta coincidente com a zona não recristalizada
6	Falta de deformação plástica	Apresenta um pedaço da junta original
7	Falta de mistura do material em zona de deformação plástica	Falta de recuperação dinâmica
8	Alinhamento de partículas no <i>nugget</i>	Permanência de um alinhamento de óxidos no <i>nugget</i> ao longo da espessura do material

As faltas de penetração são defeitos interiores à raiz do cordão. Ocorrem graças à falta de interrupção de camadas superficiais de óxidos e quando a distância entre o pino e raiz do cordão é demasiado elevada.

Quando surge um defeito de *LoP* devido ao alinhamento de camadas de óxidos há falta de mistura do material base [3,22,23], potenciando o aparecimento de fissuração [23].

Quando o pino da ferramenta está demasiado distante da base de suporte, o material sujeita-se a não obter os níveis de ligação desejada devido à falta de mistura de material na raiz do cordão. Para eliminar este defeito é necessário ter um pino que promova o fluxo visco-plástico de material e atinja a profundidade certa, sem entrar em contacto com a base de suporte [9]. Estes defeitos provocam pior desempenho da junta à fadiga [3,19,24], menor resistência ao



impacto e baixa capacidade de encurvamento segundo a raiz [3]. Um exemplo deste defeito é apresentado na Figura 2.9.

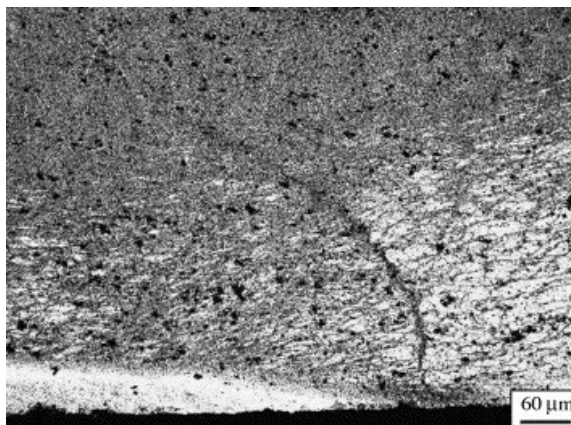


Figura 2.9 – Micrografia de defeito de falta de penetração na raiz do cordão [24].

### 2.3.3 Ensaios Não Destrutivos para a Detecção dos Defeitos na Raiz

Os ensaios não destrutivos desempenham um papel fundamental do ponto de vista industrial, servindo para classificar a qualidade de uma junta soldada sem a tornar inutilizável. Esta é uma medida preventiva de garantia de qualidade da produção, capaz de evitar resultados catastróficos e diminuir o desperdício de material que advém dos ensaios destrutivos.

Os quatro principais métodos de ensaios não destrutivos são radiológicos, de inspeção visual, por ultrassons ou através de correntes induzidas. Em SFL, a radiologia permite detetar defeitos volumétricos superiores a 0.5 mm de diâmetro, porém, apresenta dificuldade em identificar defeitos não volumétricos, principalmente defeitos orientados no plano paralelo à superfície. A inspeção visual e utilização de líquidos penetrantes é eficaz apenas em identificar defeitos superficiais. Os ultrassons têm um desempenho semelhante à radiografia no que toca a defeitos volumétricos e são capazes de detetar defeitos na raiz do cordão como faltas de penetração devido ao *corner trap effect*. O método das correntes induzidas está limitado à deteção de defeitos perto da superfície, no máximo a 1.65 mm de distância desta [3]. Devido a estas características, os END mais aplicados em SFL são os ultrassons e as correntes induzidas [20].

Os ensaios por ultrassons seguem o seguinte princípio: um transdutor transforma uma diferença de potência pulsada numa onda ultrassónica. A onda produzida é transmitida ao objeto a inspecionar e viaja por este, sofrendo alterações consoante a sua geometria e propriedades mecânicas. O sinal da onda pode ser recebido por outro transdutor, ou pelo mesmo se a onda for refletida [25]. Têm, em teoria, uma precisão de metade do seu comprimento de onda na identificação de defeitos. Na prática, é um método apto a detetar vazios, *wormholes* e inclusões provenientes de ferramentas, desde que estes sejam maiores do que 0.5 mm. Pode detetar



defeitos na raiz se a direção de propagação das ondas não for paralela à espessura do cordão soldado. Tem dificuldade em identificar alinhamento de óxidos e não está apta a distinguir inclusões de vazios sem a aplicação em simultâneo da radiologia, capaz de discerni-los pela diferença de densidades entre si [3,25].

As sondas de correntes induzidas respeitam o seguinte princípio de funcionamento: um campo magnético é produzido por uma bobina primária e parte deste campo passa por uma bobina secundária, gerando uma diferença de potencial. Sem perturbações ao sistema, a diferença de potencial gerada é constante, mas a presença de um material condutor altera a leitura da diferença de potencial na bobina secundária. Quando o condutor é exposto ao campo magnético, este produz uma corrente elétrica no material. Esta corrente elétrica é responsável por produzir um campo magnético secundário que se opõe ao original. A diferença entre estes campos é medida pela bobina secundária e esta leitura quantifica a condutividade elétrica do material produtor do campo magnético secundário, isto é, do material inspecionado [25]. As correntes induzidas estão limitadas à inspeção de materiais condutores e pecam por perder eficácia em função da sua profundidade de penetração. Não obstante, as CI podem ser usadas para detetar vazios perto da superfície do material e faltas de penetração. Têm vantagem sobre os líquidos penetrantes na medida em que não é necessária a preparação da superfície a inspecionar [3,25]. A medição da condutividade elétrica com sondas de CI também pode ser considerado um parâmetro fiável para caracterizar, à superfície, juntas soldadas por SFL, capaz de complementar ou substituir os ensaios de dureza [26]. Os desenvolvimentos recentes neste método de END visam eliminar interferências na leitura devidas ao efeito de *lift-off*, permeabilidade magnética e variações de condutividade do material ensaiado e problemas de cariz eletrónico [27].

## **2.4 Diferentes Abordagens Tecnológicas de Soldadura por Fricção Linear**

### **2.4.1 Introdução**

Os defeitos da raiz podem ser removidos recorrendo à maquinação das peças soldadas após o processo de SFL. O volume de material maquinado é designado de “espessura de sacrifício” e, idealmente, é a zona onde os defeitos se encontram. A desvantagem deste método é o custo acrescido ao processo, aumento do tempo de fabrico e necessidade de transportar a peça entre a zona da soldadura e a zona de maquinação.

Variantes da SFL foram criadas com o intuito de mitigar ou evitar os defeitos na raiz do cordão e outros problemas do processo. Um exemplo dessas variantes é a *self-reacting friction stir welding*, que utiliza dois *shoulders* entre peça a soldar para prevenir totalmente os defeitos

na raiz, e a soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica, que aquece a zona a soldar de forma a facilitar a mistura de material.

## 2.4.2 Abordagens Tecnológicas

Variantes do processo de SFL foram surgindo, gerando novas aplicações com tendência a substituir outros métodos de fabrico e criar soluções para algumas das limitações da tecnologia, tais como a mitigação dos defeitos na raiz do cordão.

A *self-reacting friction stir welding* (SR-FSW), ou *bobbin tool friction stir welding*, distingue-se da SFL pela utilização de dois *shoulders* entre o material base ligados por um pino. É possível variar a distância entre os *shoulders* e assim manter a força de pressão constante durante a soldadura [5,6]. O calor gerado e a mistura de material são mais uniformes, em comparação com SFL normal, o que elimina problemas de falta de penetração e da raiz do cordão. À exceção do caso anterior, a junta soldada apresenta propriedades mecânicas semelhantes à SFL [3,6]. Além disso, consegue soldar grandes estruturas e superfícies curvas com maior facilidade relativamente à SFL [5]. A Figura 2.10 ilustra uma ferramenta típica de SR-FSW.

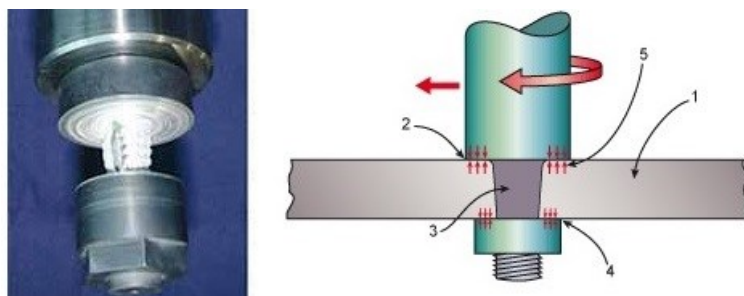


Figura 2.10 – Ferramenta de SR-FSW. 1 – Material base, 2 – *Shoulder* superior, 3 – Pino, 4 – *Shoulder* inferior, 5 – Forças de reação [6].

A *assisted friction stir welding* (soldadura por fricção linear assistida) implica a utilização de uma fonte de calor secundária, além da fricção que a ferramenta gera, para aquecer o material base. O aquecimento do MB provoca o amaciamento do mesmo, reduzindo as forças envolvidas na etapa de mergulho do pino. Isto conduz à atenuação dos efeitos do desgaste da ferramenta [3,10,28]. Sun et al. [18] desenvolveu um processo híbrido em que usa o pré-aquecimento das juntas antes usar o *friction stir spot welding*.

O material a soldar pode ser pré-aquecido, ou utilizar a fonte de calor gerada por indução elétrica, soldadura TIG ou sistema de soldadura a laser [7]. A vertente que este trabalho visa abordar utiliza o calor gerado por efeito de Joule como fonte de calor secundária.

## 2.5 Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica

Como já foi mencionado, a soldadura por fricção linear assistida utiliza uma fonte de calor secundária para facilitar sua deformação do material base. Na soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica o calor é gerado por efeito de Joule.

Uma ferramenta de SFL condutora, componente de um circuito elétrico, é usada para soldar uma junta e o contacto entre ambas fecha o circuito, permitindo a passagem de corrente. Se a junta a soldar for de um material bastante resistivo, como por exemplo uma liga de alumínio, o calor gerado na junta por efeito de Joule pode atingir temperaturas na ordem das centenas de graus Celcius, utilizando intensidades de corrente superiores a 500 A [7]. A ferramenta condutora faz passar a corrente pelo pino, que entra em contacto com a peça a soldar. A corrente é fornecida por meio de uma fonte de tensão, bateria, ou transformador que possibilite a passagem de uma corrente elétrica superior a 100 A. O material do pino deverá ser de baixa resistividade, de forma a evitar o seu aquecimento excessivo e consequente amaciamento do mesmo, que pode ser responsável por desgaste na ferramenta [14,28,29].

O aumento de temperatura na zona do cordão proveniente do efeito de Joule amacia o material base [14,28,30] e reduz as tensões no caudal de material (*material flow stresses*) [14], possibilitando melhor mistura do material e evitando o aparecimento de defeitos na raiz, como faltas de penetração. Ainda devido ao amaciamento, as forças de pressão são reduzidas, o que pode mitigar o desgaste na ferramenta e aumentar a velocidade de soldadura [14,30]. A análise numérica de Long e Khanna sugere que o calor gerado por efeito de Joule pode exceder o gerado por fricção [28].

O trabalho anteriormente realizado no NTI [7,31] permitiu desenvolvimentos de natureza analítica que validaram o conceito para intensidades de corrente elétrica da ordem dos 800 A, capazes de aumentar a temperatura no MB entre 200 °C a 300 °C. Em termos tecnológicos, foram desenvolvidos protótipos de ferramentas de SFLAE e um sistema de aquisição de dados. Experimentalmente, foi observada a redução da largura de um defeito na raiz do cordão num ensaio, como ilustra a Figura 2.11.

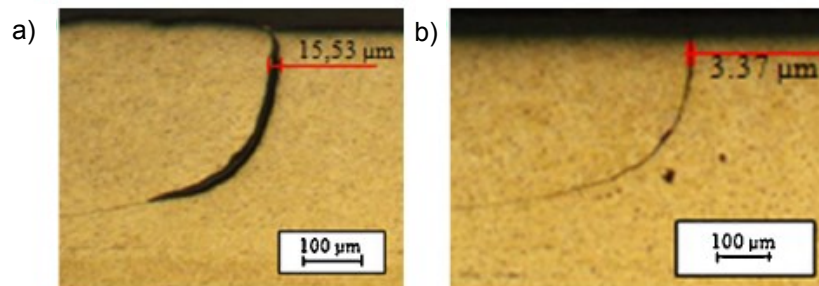


Figura 2.11 – Redução do defeito na raiz do cordão, a) macrografia de amostra sem corrente elétrica, b) macrografia de amostra com intensidade de corrente elétrica de 800 A [31].

Os estudos preliminares de Luo et. al. revelam que a SFLAE consegue maiores taxas de soldadura por unidade de tempo, visto que o amaciamento do material base permite maior velocidade de soldadura com a aplicação da mesma força [30]. Posteriormente, o trabalho experimental desenvolvido em juntas topo-a-topo de liga de magnésio AZ31B soldadas por SFLAE permitiu concluir que a aplicação de corrente elétrica no processo gera melhor acabamento superficial e a microestrutura das ZTMAs e do *nugget* apresentam tamanho de grão inferior ao obtido nas mesmas zonas num cordão soldado por SFL [29]. A continuação deste trabalho produziu resultados redundantes aos anteriores para a mesma liga e classifica o processo como capaz de soldar ligas de alta resistência, como 2Cr13Mn9Ni4 e Q235B, mas revelou que em liga de alumínio AA 7075 o tamanho do grão aumenta no *nugget* e ZTMA quando a intensidade de corrente elétrica é aumentada [32]. A Figura 2.12 mostra macrografias de amostras dos ensaios em AA 7075.

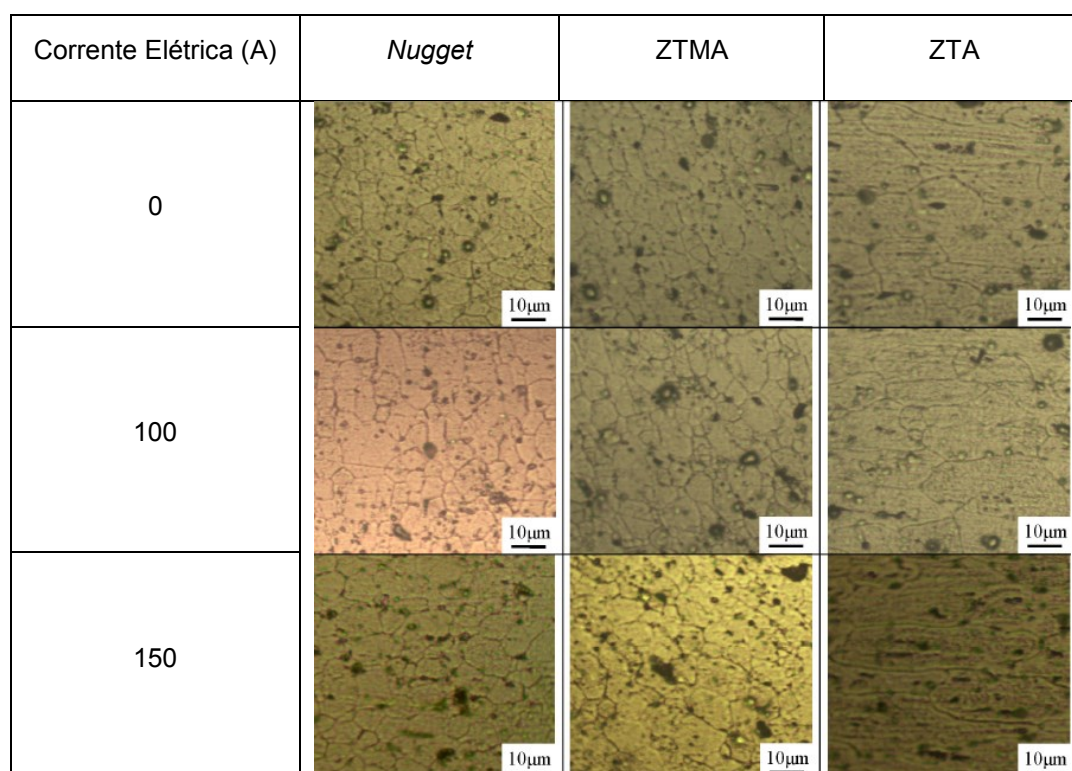


Figura 2.12 - Micro estrutura de secções transversas de juntas em AA 7075, adaptado de [32].

## 2.6 Síntese do Capítulo

Este capítulo apresentou a pesquisa bibliográfica efetuada sobre SFL, processos variantes, em especial as vertentes assistidas por corrente elétrica, e os defeitos na raiz do cordão.

O processo de SFL destaca-se na indústria pela capacidade de soldar matérias normalmente não-soldáveis pelos processos de fusão. Apesar desta atrativa característica,

defeitos na raiz afetam regularmente o cordão soldado e são responsáveis pela deterioração das qualidades mecânicas da junta soldada, principalmente quando sujeita à fadiga. Algumas variantes do processo são capazes de resolver este problema, como o *self-reaction friction stir welding*, mas ainda trazem limitações à sua aplicação em várias indústrias.

A análise do trabalho desenvolvido anterior a este estudo revela que a SFLAE é estudada principalmente com o objetivo de reduzir as forças de pressão, torque gerada pela rotação da ferramenta, desgaste sofrido pela ferramenta e caracterização de juntas soldadas.



---

## 3 Desenvolvimentos Experimentais em Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Elétrica

### 3.1 Introdução

No âmbito do trabalho anteriormente desenvolvido no NTI [7],[31], foi desenvolvido e testado um protótipo de ferramenta de SFLAE com capacidade para a passagem de corrente elétrica com intensidades superiores a 1000 A pelo material base. No entanto, dos vários ensaios realizados apenas num cordão se constatou uma diferença decrescente do tamanho do defeito da raiz duma zona de intensidade de corrente nula para uma zona de aplicação de corrente elétrica. É possível que estes resultados devam-se à dispersão da corrente elétrica pelo *shoulder* de aço da ferramenta usada, fazendo com que apenas uma pequena percentagem da corrente tenha sido conduzida pela zona da raiz e provocando um aumento de temperatura por efeito de Joule menor do que o previsto.

Foi com base nestas necessidades que surgiu a motivação para desenvolver novas ferramentas capazes de concentrar as correntes elétricas na zona da raiz do cordão, para causar um aumento de temperatura localizado que promova a mistura de material nessa zona.

Neste capítulo descrevem-se no § 3.2 as novas abordagens tecnológicas de ferramentas de SFLAE desenvolvidas e os pressupostos tomados em consideração. Cada abordagem tem a descrição do respetivo protótipo. As ferramentas aqui descritas foram projetadas no NTI e produzidas com diferentes processos e materiais. No § 3.3 são descritos os equipamentos auxiliares ao processo, como o sistema de aquisição de dados e as fontes de corrente elétrica.

### 3.2 Novas Abordagens Tecnológicas

Novas metodologias foram desenvolvidas para testar o calor adicional no processo gerado por efeito de Joule. A apresentação das metodologias segue uma ordem que vai desde a ferramenta que provoca maior densidade de corrente na raiz do MB à que apresenta maior dispersão da corrente elétrica. As ferramentas foram criadas seguindo os requisitos funcionais apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Requisitos funcionais das ferramentas desenvolvidas.

Nº	Funcionalidade	Comentário
1	Concentrar a corrente elétrica na zona de raiz do cordão	Uma maior densidade de corrente elétrica promove o aumento da temperatura por efeito de Joule
2	Promover a mistura do material	É uma funcionalidade fulcral para a criação de uma boa junta de SFL
3	Apresentar resistência às forças envolvidas no processo	Essencial para a vida útil do protótipo
4	Garantir compatibilidade com o equipamento existente	O corpo da ferramenta deve ser dimensionado para ser fixado corretamente na fresadora

### 3.2.1 Abordagem Tecnológica #1: Pino e *shoulder* em alumina

A primeira metodologia baseia-se numa ferramenta composta por uma peça que engloba o pino e *shoulder* produzidos em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), um material cerâmico de baixa condutividade, de cerca de  $1.7 \cdot 10^{-12}$  S/m. O pino e *shoulder* são atravessados por um furo que contém uma alma de cobre, responsável por conduzir toda a corrente elétrica para o material base. O *design* desta ferramenta sugere que toda a corrente que passa por ela seja concentrada na alma de cobre, já que no fenómeno de condução elétrica a corrente tende a passar pelos materiais menos resistivos. Deste modo, este é o caso mais favorável à passagem de corrente e sua concentração na zona da raiz do cordão. A Figura 3.1 ilustra o princípio de funcionamento desta abordagem tecnológica.

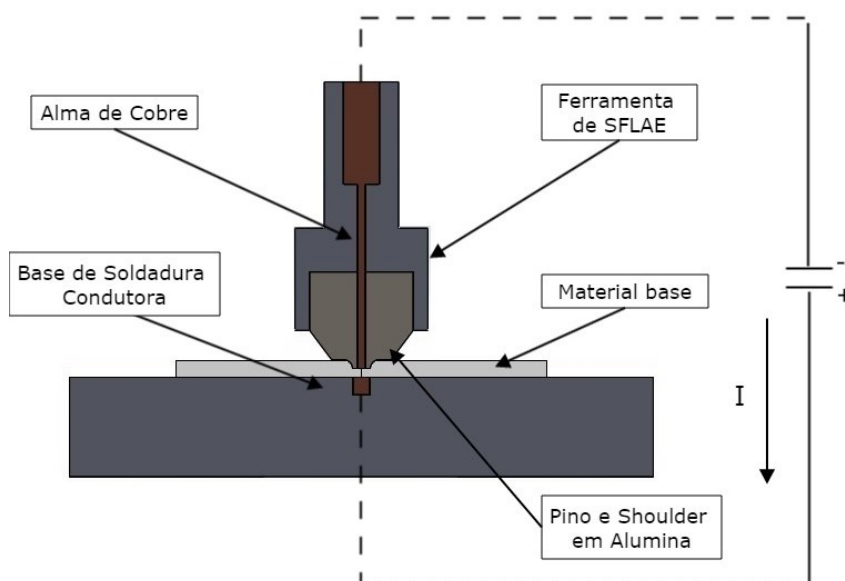


Figura 3.1 – Esquema de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica para a abordagem tecnológica #1.



Uma ferramenta comum de SFL produzida em aço proporciona a dispersão da corrente elétrica que por ela passa por toda a área em contacto com o material base. A tentativa de inovação apresentada consiste no desenvolvimento de uma ferramenta de materiais de menor condutividade capazes de realizar um cordão de soldadura por fricção linear.

Para observar a influência da corrente confinada num menor volume de controlo, criou-se uma ferramenta com pino e *shoulder* em alumina sinterizada. Este material oferece uma resistência à passagem da corrente elétrica superior à do aço e possui as qualidades mecânicas necessárias ao funcionamento como ferramenta de SFL. Na Tabela 3.2 estão os valores de resistividade e condutividade do cobre e dos materiais em questão.

Tabela 3.2 – Resistividade elétrica em  $\Omega.m$  e condutividade elétrica em S/m e % IACs [33].

	Cobre	Aço AISI H13	Alumina
Resistividade Elétrica ( $\Omega.m$ )	$1,70 \cdot 10^{-8}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{12}$
Condutividade Elétrica (S/m)	$5,80 \cdot 10^7$	$1,92 \cdot 10^6$	$1,00 \cdot 10^{-12}$
% IACS	100	3,3	$1,7 \cdot 10^{-20}$

A peça que constitui *shoulder* e pino tem a forma de um cilindro que adquire a forma de cone truncado a dada altura e possui um pino nessa extremidade. Tem o furo no centro para que possa conter a alma de cobre. Acima do *shoulder* há um facejamento para fixar a peça à ferramenta com um perno roscado. A Figura 3.2 e Figura 3.3 representam a peça de alumina.

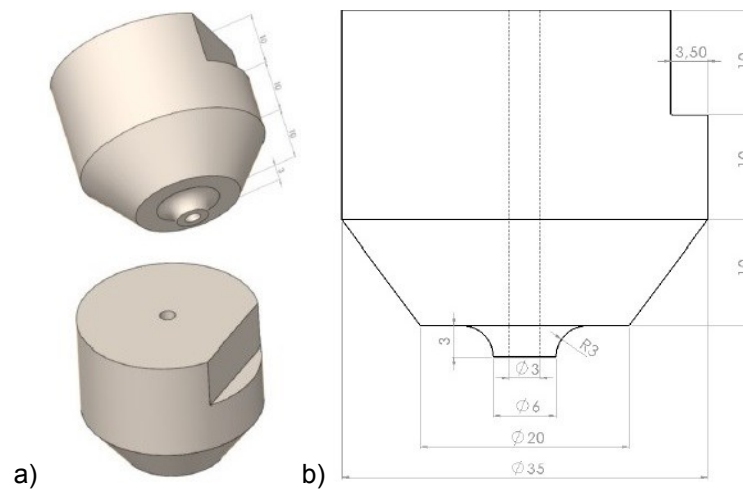


Figura 3.2 – Ferramenta em alumina; a) Perspetiva, b) Desenho Técnico.

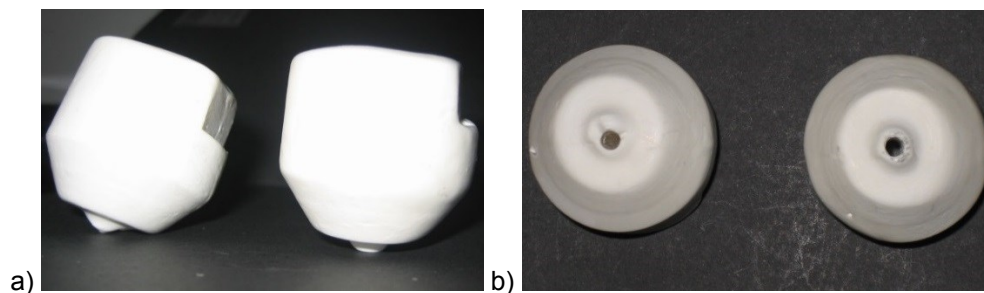


Figura 3.3 – Fotos das ferramentas em alumina; a) Perfil, b) Vista de planta.

Para as metodologias de *shoulder* em alumina foram criados 2 corpos para conter as ferramentas. Ambos foram fabricados em liga de alumínio de série 2xxx e possuem dimensões e geometria semelhantes, salvo no diâmetro do furo que acolhe as peças de alumina. O corpo e alma de cobre são representados na Figura 3.4 e Figura 3.5.

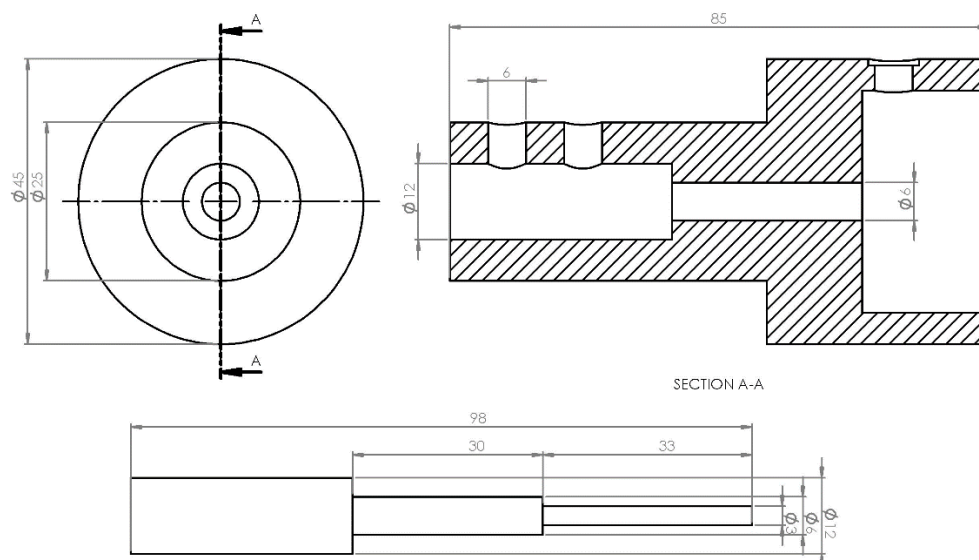


Figura 3.4 – Corpo da ferramenta e alma em cobre.



Figura 3.5 – Foto do corpo da ferramenta e alma em cobre

O varão de cobre de secção variável foi torneado para servir de alma da ferramenta de alumina. Em alternativa, também se usou um cabo unifilar de cobre de 2.7 mm de diâmetro, suficiente para fazer a corrente passar pela ferramenta e para o material base.

### 3.2.2 Abordagem Tecnologia #2: Pino em aço e shoulder em alumina

Uma das limitações da primeira metodologia é o pino liso, uma geometria pouco utilizada em SFL, já que proporciona o aparecimento de defeitos, como vazios (*voids*) [9] e fraca qualidade geométrica devido ao processo de fabrico utilizado. Na segunda metodologia, apresenta-se um pino roscado *triflute*, em aço ferramenta H13 e um *shoulder* em alumina. Neste caso, a corrente percorre todo o pino. Em comparação com o caso anterior, a densidade de corrente elétrica entre a ferramenta e material base é inferior, mas consegue-se obter um equilíbrio entre a passagem de corrente localizada e qualidade de soldadura proporcionada pela geometria do pino. A Figura 3.6 apresenta o esquema de funcionamento desta abordagem tecnológica de SFLAE.

Graças às propriedades da alumina mencionadas no §3.2.1, decidiu-se desenvolver uma ferramenta que aliasse essas propriedades a uma boa geometria de pino, isto é, roscado e com *flats* (canais). Dada a dificuldade de processar um pino em alumina com a geometria desejada, optou-se por usar um pino tradicional de aço ferramenta (Figura 3.7) e um *shoulder* em alumina (Figura 3.8). Esta solução apresenta maior dispersão da corrente elétrica do que a solução anterior, visto que esta pode passar por toda a área do pino em contacto com material base.

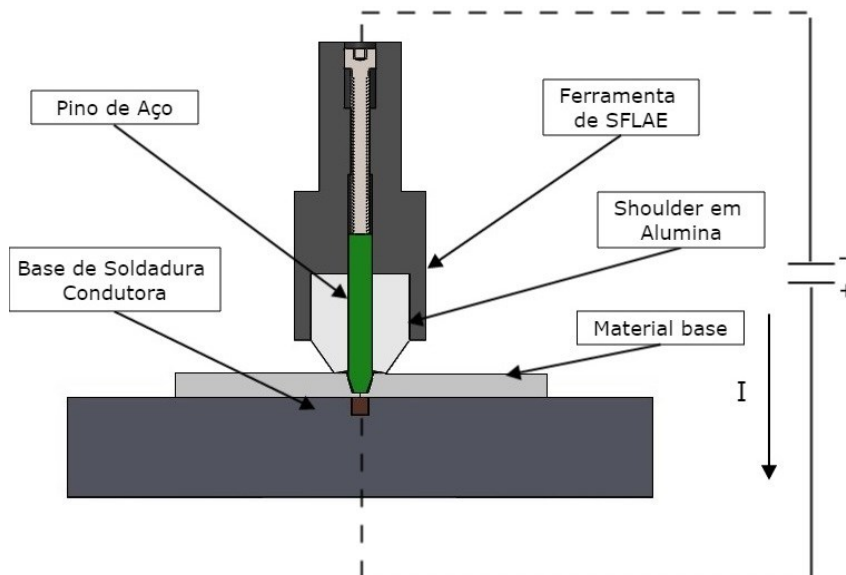


Figura 3.6 – Esquema de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica para a abordagem tecnológica #2.

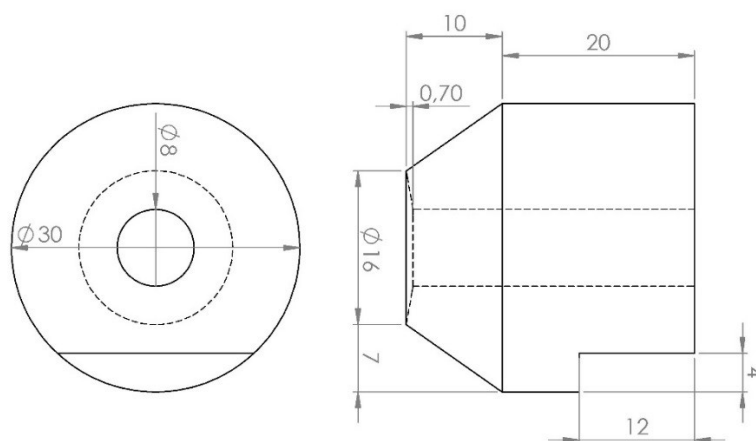


Figura 3.7 – Desenho técnico do *shoulder* de alumina para a ferramenta da AT2.

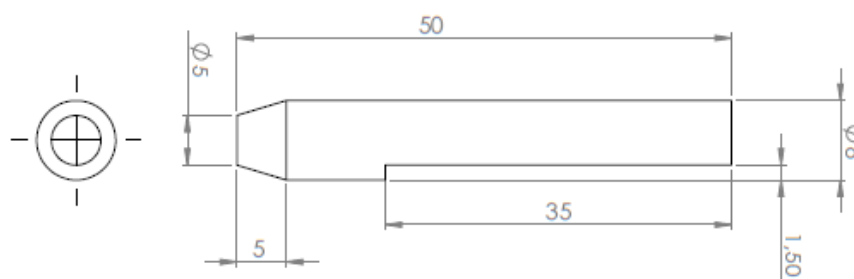


Figura 3.8 – Desenho técnico do pino de aço para as ferramentas das abordagens tecnológicas #2 e #3.

### 3.2.3 Abordagem Tecnológica #3: Pino em aço e *shoulder* em titânio

Constituída por um pino de aço e *shoulder* em titânio revestido, a ferramenta desta metodologia é a mais semelhante às da soldadura por fricção linear tradicionais. O corpo da ferramenta foi fabricado em titânio grau 3, com uma base de superfície côncava revestida a dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) por plasma com *spraying* em atmosfera oxidante, com 300 µm de espessura de revestimento, para permitir o isolamento da corrente elétrica e aumentar a dureza superficial do *shoulder*. A abordagem tecnológica descrita é ilustrada pela Figura 3.9. Optou-se por incluir nos ensaios uma ferramenta de pino em aço ferramenta (o mesmo descrito no §3.2.2) e *shoulder* em titânio (Figura 3.10). Esta ferramenta apresenta a maior dispersão de corrente elétrica de todas as abordagens desenvolvidas neste trabalho, visto que a corrente pode passar por toda a área da ferramenta em contacto com o material base.

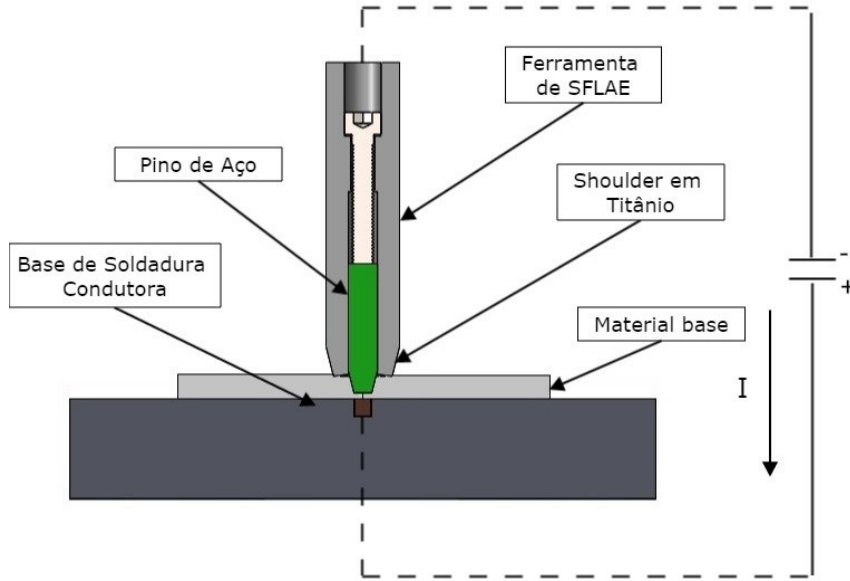


Figura 3.9 - Esquema de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica para a abordagem tecnológica #3.

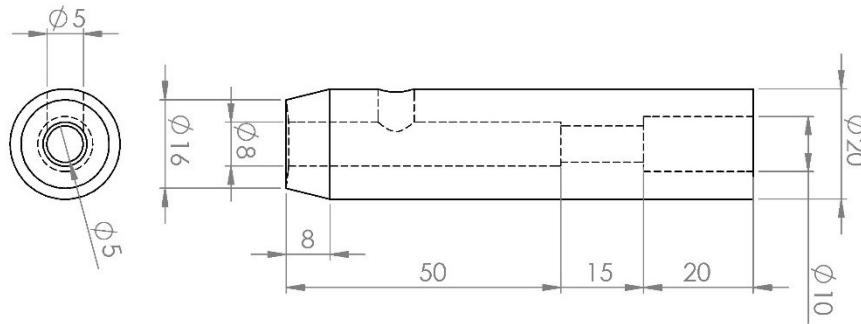


Figura 3.10 – Desenho técnico do *shoulder* para a ferramenta da 3ª abordagem tecnológica.

A dispersão da corrente elétrica pela ferramenta pode ser estimada com o cálculo da passagem de corrente elétrica pela área da ferramenta em contacto com o material base. Este cálculo baseia-se na distribuição de uma corrente de 1 A ao passar pelo *shoulder* e pino da ferramenta, ao considerar que o pino e *shoulder* se comportam como duas resistências elétricas em paralelo, tal como exemplificado pela Figura 3.11.

$$I = I_{Pino} + I_{Shoulder} = 1 \quad (3.1)$$

$$V = R_{Pino} \cdot I_{Pino} = R_{Shoulder} \cdot I_{Shoulder} \quad (3.3)$$

$$\frac{I_{Shoulder}}{I_{Pino}} = \frac{R_{pino}}{R_{Shoulder}} = \frac{\left( \rho_{el} \cdot \frac{l}{A} \right)_{Shoulder}}{\left( \rho_{el} \cdot \frac{l}{A} \right)_{Pino}} \quad (3.3)$$

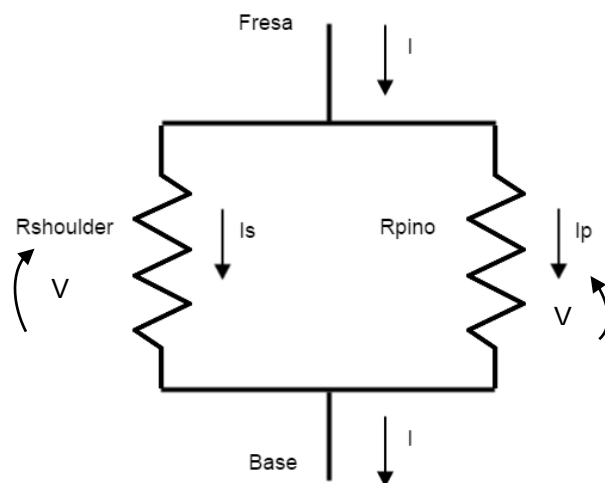


Figura 3.11 – Circuito elétrico equivalente à passagem da corrente do pino para a base de soldadura.

Os termos de resistividade elétrica e área apresentam-se na Tabela 3.3. para todas as abordagens tecnológicas. O cálculo da área em contacto com o pino é a soma da área da base com a área lateral do pino (cone truncado) para as AT2 e AT3.

Tabela 3.3 – Resistividade elétrica e área em contacto com o MB para o pino e *shoulder*.

	Componente	Resistividade ( $\Omega\text{m}$ )	Área em Contacto ( $\text{mm}^2$ )	% Intensidade de Corrente
AT1	Alma do Pino (Cobre)	1,7*E-07	7,07E-06	100
	<i>Shoulder</i> (Alumina)	1,0E-12	227E-06	0
AT2	Pino (Aço H13)	5.2E-07	67.9E-06	100
	<i>Shoulder</i> (Alumina)	1,0E-12	50.3E-06	0
AT3	Pino (Aço H13)	5.2E-07	67.9E-06	82.4
	<i>Shoulder</i> (Titânio Grade 3)	5.4E-06	150.8E-06	17.6

Assim, conclui-se que na abordagem tecnológica #3, cerca de 82% da corrente elétrica passa pelo pino e 18% passa pelo *shoulder*. Para as restantes, a passagem de corrente passa toda pela alma de cobre (AT1), ou pelo pino (AT2).

### 3.2.4 Bases de Soldadura

Além de fornecer suporte ao material base e garantir o seu aperto, a base de soldadura no processo de SFLAE é responsável por condicionar a passagem de corrente elétrica. Às abordagens tecnológicas desenvolvidas associaram-se duas bases distintas: uma base de aço e uma base de mármore.

A base de aço é uma peça maciça constituída por um bloco de aço desenhado para o aperto das chapas a soldar e um varão de cobre de secção quadrada, que passa pelo eixo de simetria da peça, no sentido do cordão de soldadura. Com esta base, a corrente elétrica passa pela ferramenta, pelo MB e finalmente por si mesma, fechando o circuito. Este componente já tinha sido desenvolvido no NTI e é apresentado na Figura 3.12.

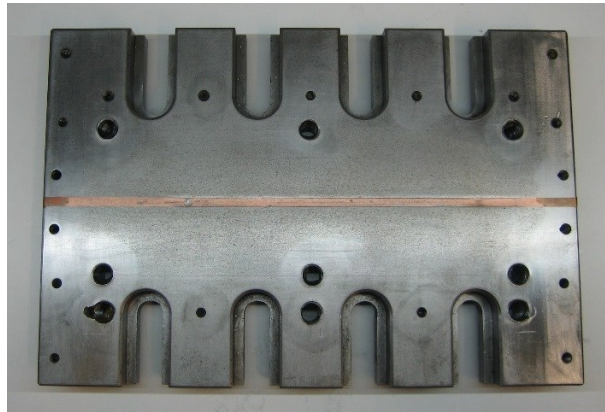


Figura 3.12 – Base de soldadura condutora, em aço, com cobre no eixo de simetria. Dimensões: 300×200×35 mm.

As perdas de calor por condutividade térmica do MB para a base de soldadura motivaram o desenvolvimento deste componente noutro material mais isolador. Estas perdas podem ser quantificadas assumindo um aumento de temperatura da base de aço e considerando que 5 kW de potência mecânica são transmitidos da máquina para o MB, durante a soldadura de chapas de AA2024-T351 com 3,9 mm de espessura [31]. Considerou-se um cordão de 180 mm de comprimento, soldado com uma velocidade de avanço de 112 mm/min. O peso da base é de 13,2 kg e o calor específico do aço é de 486 J/Kg°C. A energia necessária para aumentar a temperatura da base de aço em 30 °C é calculada na Equação 3.4. A Equação 3.5 calcula o tempo em função do comprimento do cordão e velocidade de soldadura e a Equação 3.6 calcula a energia mecânica que a fresadora aplica nas chapas a soldar. O rácio entre a energia requerida pela base e energia mecânica transmitida é feito na Equação 3.7.

$$Q_{aço} = m \cdot C \cdot \Delta T = 13.2 \times 486 \times 30 = 193 \text{ kJ} \quad (3.4)$$

$$tempo_{soldadura} = \frac{L}{v_x} = 96.5 \text{ s} \quad (3.5)$$

$$P_{mec} = 5000 \text{ W}$$

$$E_{mec} = P_{mec} \cdot t_{soldadura} = 482 \text{ kJ} \quad (3.6)$$

$$\frac{Q_{aço}}{E_{mec}} = 0.399 \quad (3.7)$$

Conclui-se pelos, que para a base de aço aumentar 30 °C são necessários 193 kJ, o que significa que 40% do calor produzido pela ferramenta é dissipado para a base.



Figura 3.13 – Base de soldadura isolante, em mármore. Dimensões: 210×210×95 mm.

Para melhor isolar o calor no material base e testar outra forma de passagem de corrente, utilizou-se uma base de mármore. Esta consistia num simples bloco de mármore e a fixação do MB fez-se através de apertos independentes. Ao contrário da base de aço, esta é altamente isolante. O fecho do circuito fez-se diretamente no MB, de forma a diminuir a dispersão de corrente elétrica e difusão de calor pela base de soldadura. Esta base cumpre os requisitos funcionais apresentados na Tabela 3.4 e é ilustrada pela Figura 3.13. Algumas propriedades mecânicas das bases são resumidas na tabela.

Tabela 3.4 – Requisitos funcionais da base de soldadura isolante.

Nº	Funcionalidade	Comentário
1	Evitar que a corrente elétrica se disperse pela base	O material deve possuir baixa condutividade própria de um isolante.
2	Concentrar o calor gerado pelo processo no MB	Necessita de baixa condutividade térmica e baixa difusão térmica
3	Garantir a fixação do material base	Fixação incorreta é propícia a fraca qualidade dos cordões















Tabela 3.5 – Propriedades dos materiais das bases de soldadura [33].

	Resistividade elétrica ( $\Omega \cdot m$ )	Condutividade elétrica (S/m)	Condutividade térmica (W/m $\cdot^{\circ}C$ )	Calor específico (J/Kg $\cdot^{\circ}C$ )
Base de Aço	5.2E-07	1.92E+06	24.3	486
Base de Mármore	1.8E+08	5.56E-09	2.08 a 2.99	880

As três abordagens tecnológicas e as duas bases de soldadura permitem 6 combinações diferentes de ferramenta e base. Foram estudadas 5 combinações neste trabalho, todas exceto a abordagem tecnológica #2 com a base de mármore.

Tabela 3.6 – Combinações Possíveis nos Ensaio Experimentais

		Abordagens Tecnológicas		
		Abordagem Tecnológica #1	Abordagem Tecnológica #2	Abordagem Tecnológica #3
Bases	Base de Aço	AT1-B1  + 	AT2-B1  + 	AT3-B1  + 
	Base de Mármore	AT1-B2  + 	AT2-B2  + 	AT3-B2  + 

### 3.3 Adaptação ao Protótipo Existente

O aparato tecnológico disponível no NTI foi adaptado às necessidades deste trabalho. O equipamento tinha já sido desenvolvido para trabalhos do mesmo tema e sofreu algumas melhorias com as inovações propostas nesta dissertação. Destas, as principais foram a alteração do tipo de corrente, que passa de contínua (DC) para alternada (AC), e a forma como se mede o valor RMS através duma atualização do código do LabView

### 3.3.1 Equipamento

As soldaduras foram realizadas com recurso a uma fresadora adaptada à tecnologia da soldadura por fricção linear, um equipamento do laboratório de Processos Mecânicos do NTI, do DEMI, da FCT – UNL. A base deste aparelho tem três graus de liberdade, e permite a movimentação automática segundo os três eixos X, Y e Z. As velocidades de rotação e de avanço são controláveis, podendo atingir velocidades de rotação de 56 a 1800 rev/min e velocidades de avanço de 11.2 a 1120 mm/min. O controlo da força vertical é feito inclinando a cabeça da máquina.

### 3.3.2 Sistema de aquisição de dados

No trabalho anterior, foi desenvolvido um sistema completo de aquisição de dados constituído por um sensor amperimétrico, placa de aquisição e termopares. Este sistema possui uma fonte de alimentação de 12 V.

O sensor amperimétrico utilizado funciona com um par de transdutores amperimétricos, o LEM® LF 1005-s e LEM® HTA 400-s, para uma redundância dos valores adquiridos. Os transdutores baseiam-se no efeito de Hall, mas o LEM® LF 1005-s usa tecnologia *closed loop*, enquanto o LEM® HTA 400-s usa tecnologia *open loop*. Estes são capazes de medir correntes de 0 a 1500 e 0 a 1000, respetivamente.

Para confirmar as leituras do sensor amperimétrico, utilizou-se um multímetro FLUKE 289 True RMS Multimeter com pinças amperimétricas FLUKE i410 AC/DC Current Clamp.

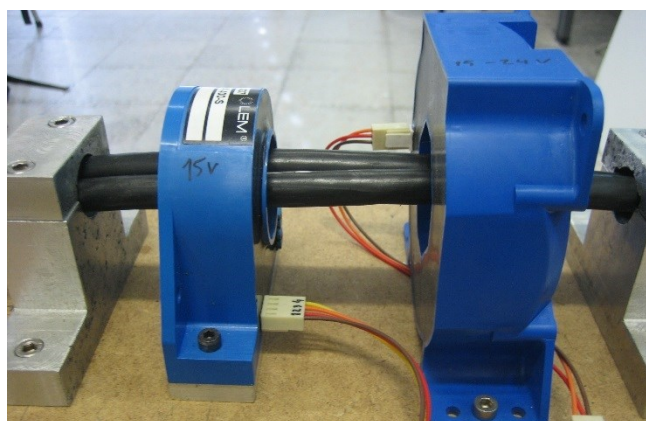


Figura 3.14 – Transdutores amperimétricos. À esquerda LEM® HTA 400-s, à direita LEM® LF 1005-s.

A placa de aquisição de dados NI USB 6008, da NATIONAL INSTRUMENTS®, mede a diferença de potencial entre ferramenta e base, lê a intensidade de corrente no sensor amperimétrico e faz a leitura de temperatura dos termopares e comunica todos estes dados ao *software* de LabView num PC.

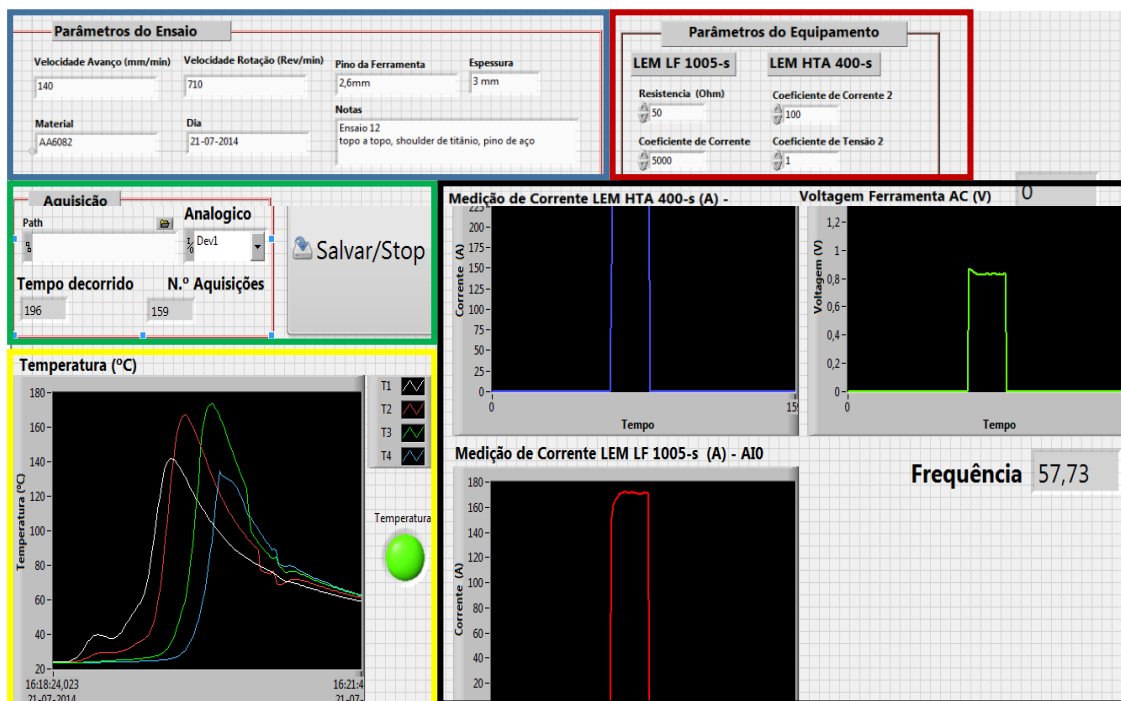


Figura 3.15 - Ambiente do programa em LabVIEW. Zona Azul (A): parâmetros do Ensaio; zona Vermelha (B): parâmetros do equipamento; zona Verde (C): opções de aquisição de dados; zona Amarela (D): gráfico opcional de registo de temperatura; zona Preta (E): gráficos de registo de corrente elétrica e voltagem na ferramenta.

O *software* desenvolvido em linguagem G, no ambiente LabVIEW™ 2012 da NATIONAL INSTRUMENTS®. A Figura 3.15 mostra as áreas do ambiente de trabalho do *software*. Esta janela é composta pelos parâmetros do ensaio experimental (A), parâmetros dos equipamentos (B), opções de aquisição de dados e botão de paragem de aquisição (C), gráfico opcional do registo de temperatura dos termopares (D) e gráficos das duas leituras de intensidade de corrente e voltagem de corrente, assim como a frequência da fonte de corrente elétrica. A alteração mais relevante ao *software* adaptou-o à leitura de corrente alternada fornecida pela nova fonte de alimentação.

### 3.3.3 Sistema de Alimentação

Inicialmente, utilizou-se uma bateria (DC) de 12 V e 200 Ah. Apesar de fornecer ao circuito uma corrente elétrica de 700 A, esse valor diminuía em segundos para 50 % e 30 % da intensidade original. A necessidade de recargar a bateria após as soldaduras aumentava o tempo de *standby* entre os ensaios.

Como alternativa, usou-se um transformador de corrente alternada ligado à rede monofásica. O transformador consiste numa máquina de soldadura por pontos modificada, sem os terminais. Esses são substituídos por cablagens que ligam à base de soldadura e à fresadora, fechando o circuito. Com este método foi possível atingir valores constantes de cerca de 300 A (AC) durante tempo necessário à realização do ensaio.

### 3.4 Montagem Experimental

Durante os ensaios, foram realizadas 5 montagens experimentais diferentes, cujas diferenças estão na ferramenta fixada à fresadora e base de soldadura usada. O esquema geral da montagem, válida para todas as abordagens tecnológicas, é representado pela Figura 3.16.

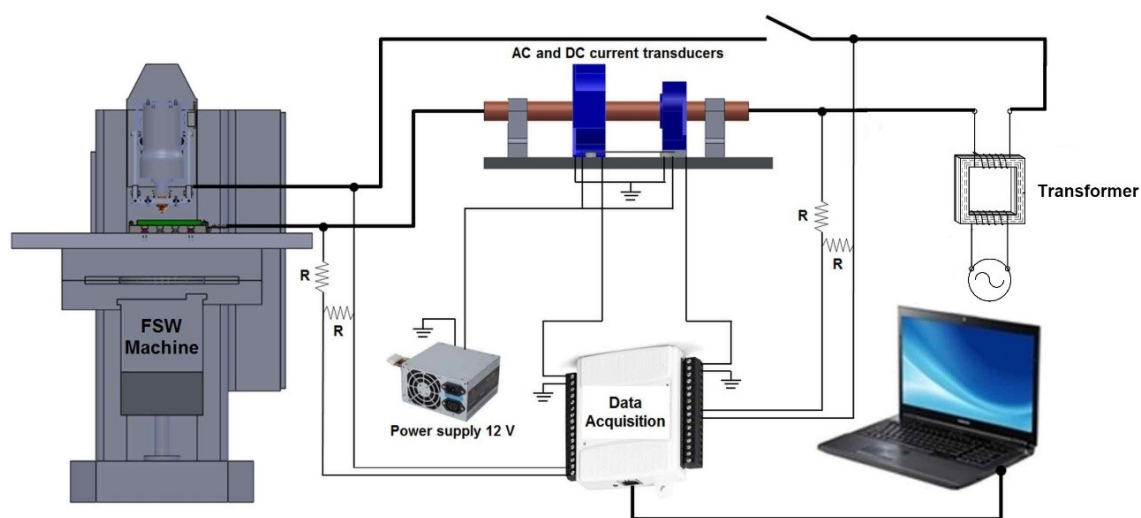


Figura 3.16 – Esquema geral da montagem.

Em todos os ensaios, a ferramenta de SFL foi enroscada na fresadora e o MB foi fixado à base de soldadura na base da fresadora. Estes componentes formam um circuito em série quando ligados à fonte de corrente elétrica.

Com a base de aço, a fresadora ligou-se ao terminal negativo da fonte de corrente elétrica e a base de soldadura ligou-se ao terminal positivo. No caso da base de mármore, o terminal positivo da fonte foi diretamente ligado às chapas de material base. As cablagens do terminal positivo passam pelos sensores amperimétricos alimentados por uma fonte de tensão

de 12 V. Uma placa de aquisição de dados está ligada à fresadora, base de soldadura, terminais da fonte de corrente elétrica, sensores amperimétricos e termopares.

O *software* em LabVIEW anteriormente desenvolvido permite visualizar a corrente e voltagem na bateria, queda de potencial entre fresa e suporte e ainda a temperatura registada por termopares.

### 3.5 Síntese do Capítulo

As novas abordagens tecnológicas foram desenvolvidas com o intuito de tirar o melhor aproveitamento do calor gerado por resistência elétrica e aplicando-o na raiz no cordão. Foi possível definir seis combinações diferentes de abordagens tecnológicas/base de soldadura para estudar neste trabalho.

O aparato tecnológico previamente existente foi atualizado. Entre as mudanças, a mais significativa é a nova fonte de alimentação de corrente elétrica. Em vez de uma bateria (DC) utilizou-se um transformador (AC), que fornece uma intensidade de corrente inferior, mas constante ao longo de todo o ensaio.



## 4 Simulações

### 4.1 Introdução

Para validar o conceito de SFLAE foi necessário, nos trabalhos realizados no NTI [7,31], o desenvolvimento de um modelo analítico que quantificasse o calor gerado por efeito de Joule na raiz do material base. No § 4.2 apresenta-se uma nova proposta de modelo, que toma em consideração a variação da resistividade elétrica dos materiais com o aumento de temperatura. Estes consideram apenas o calor gerado por efeito de Joule para aumentar a temperatura do MB. Tendo em vista antecipar a distribuição da densidade de corrente nas diferentes abordagens tecnológicas, foram realizadas simulações numéricas em vários modelos geométricos realizadas com o *software* CST Studio (§ 4.3). No § 4.4, a teoria da simulação analítica é aplicada aos resultados do *software* para obter um perfil de temperatura do modelo do sistema ferramenta/MB.

### 4.2 Simulação Analítica

Para obter uma perceção do efeito da corrente elétrica na soldadura por fricção linear, foi desenvolvido um modelo teórico para calcular o aumento de temperatura num material base causado pela passagem de corrente elétrica. Os parâmetros de processo relevantes para o modelo teórico são partilhados por todas as abordagens tecnológicas. Estes dividem-se em parâmetros do material base, da geometria, de velocidades e de corrente elétrica (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Parâmetros comuns do modelo teórico

Material	Densidade	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$
	Resistividade Elétrica	$\rho_{ele} \text{ (}\Omega \text{ m)}$
	Calor Específico	$C \text{ (J/Kg } ^\circ\text{C)}$
Geometria	Altura	$h \text{ (mm)}$
	Diâmetro	$\phi \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$
Parâmetros de Soldadura por Fricção Linear	Velocidade de Avanço	$v_x \text{ (mm/min)}$
Intensidade de Corrente Elétrica		$I \text{ (A)}$

A temperatura é um parâmetro importante na soldadura por fricção linear assim como na vertente em estudo: se for muito baixa, o material base não amacia o suficiente e, se for muito alta, esta pode causar degradação das propriedades do material, tanto para o MB como para a ferramenta. Para a dedução do novo modelo, baseou-se na equação fundamental da calorimetria e consideraram-se as hipóteses simplificativas propostas em [7,31], isto é:

- Considera-se que o processo decorre em regime estacionário;
- Não são consideradas trocas de calor com o meio ambiente;

- Não é considerado o trabalho realizado pelo atrito entre a ferramenta e o MB: apenas o calor gerado por efeito de Joule é tido em conta;

Ao modelo descrito a cima, ainda são aplicadas as seguintes modificações às hipóteses simplificativas.

- Alteração do volume de controlo considerado e consequente alteração do tempo de intersecção da alma de cobre com o VC;
- Inclusão do parâmetro da resistividade elétrica do MB, variável com o aumento de temperatura do material.

Assim, considerando que o calor proveniente do efeito de Joule é todo convertido em aumento de temperatura do material a soldar, é possível igualar a equação fundamental da calorimetria (4.1) ao calor gerado por efeito de Joule (4.2) e começar a dedução do modelo de cálculo de temperatura (4.3), onde:  $m$  [kg] é a massa do volume de controlo,  $c$  [J/kg°C] é o calor específico,  $\Delta T$  [°C] é o aumento de temperatura,  $R$  [ $\Omega$ ] é a resistência elétrica do material,  $I$  [A] a intensidade de corrente elétrica e  $t$  [s] o tempo de passagem de corrente.

$$Q_{Temperatura} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

$$Q_{Joule} = R \cdot I^2 \cdot t \quad (4.2)$$

$$Q_{Temperatura} = Q_{Joule} \Leftrightarrow m \cdot c \cdot \Delta T = R \cdot I^2 \cdot t \quad (4.3)$$

O termo massa pode ser calculado pela equação 4.4, onde:  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] é a densidade do material,  $h$  [m] é a altura do VC e  $\Phi$  [m] é o diâmetro. O tempo calculado na equação 4.5, está relacionado com a velocidade de avanço  $v_x$  [m/s] e com a média da interseção entre pino e VC ao longo do movimento, dada por  $2 \cdot \Phi \cdot N$  [m], onde  $N$  é um fator corretivo adimensional explicado mais adiante. A resistência elétrica é calculada com a equação 4.7, onde  $\rho_{el}$  [ $\Omega$ m] é a resistividade do material,  $h$  [m] é a altura do VC e  $A$  [m<sup>2</sup>] área de secção do VC. Aqui,  $\rho_{el}$  pode ser calculado em função da resistividade elétrica à temperatura ambiente  $\rho_0$  [ $\Omega$ m], variação de temperatura  $\Delta T$  [°C] e coeficiente de temperatura  $\alpha$  [1/T]. Assim, deduz-se o modelo teórico (4.8) que exprime o aumento de temperatura num material, em função da geometria, propriedades do material, duração e intensidade de corrente.

$$m = \rho \cdot h \cdot \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \quad (4.4)$$

$$t = \frac{2 \cdot \phi \cdot N}{v_x} \quad (4.5)$$

$$R = \frac{\rho_{ele} \cdot h}{A} \quad (4.6)$$

$$\rho_{ele}(\Delta T) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (4.7)$$



$$\Delta T = \frac{16 \cdot I^2 \cdot \rho_{el}(\Delta T) \cdot t}{\pi^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \phi^4} \quad (4.8)$$

$$\Delta T = \frac{16 \cdot I^2 \cdot \rho_0 \cdot t}{\pi^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \phi^4 - 16 \cdot I^2 \cdot \rho_0 \cdot \alpha \cdot t} \quad (4.9)$$

O modelo deduzido da equação 4.10 é valido apenas para uma situação onde a velocidade de avanço é nula. Para incluir este parâmetro no modelo, é necessário estimar o tempo em que a superfície da alma de cobre está em contato com a base do volume de controlo, em função da velocidade de avanço da ferramenta.

O termo N, da equação 4.5, representa um fator de correção da área de intersecção entre a alma de cobre e o volume de controlo, correspondente à média da percentagem de intersecção ao longo do movimento. A Figura 4.1 ilustra as fases de intersecção das duas áreas.

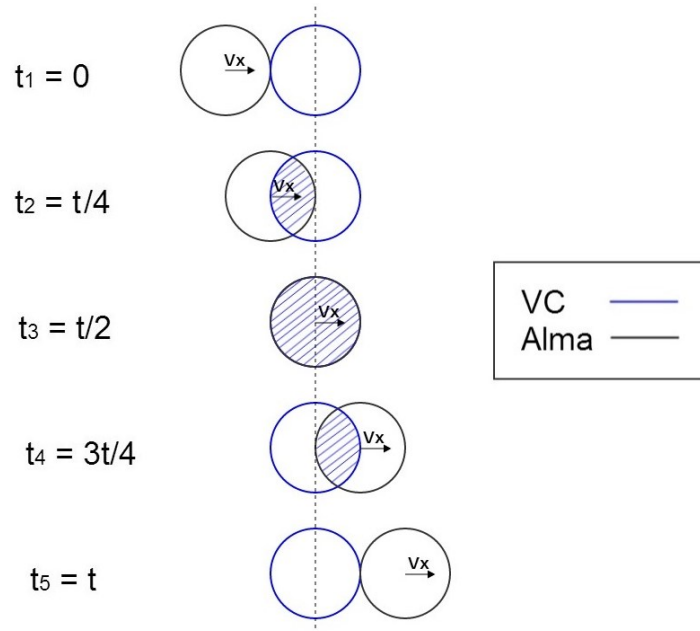


Figura 4.1 – Fases de intersecção da alma do cobre com o VC. Em t3 há 100% de intersecção, em t2 e t4 há 39,1% e em t1 e t5 a intersecção é nula.

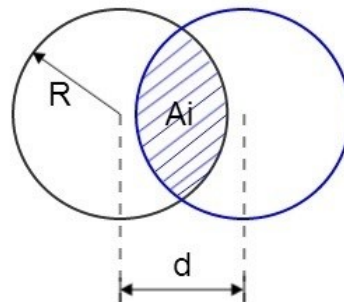


Figura 4.2 – Termos de  $A_i(d)$ .

As áreas da alma e do volume de controlo só se intersectam totalmente num momento do processo, o que se traduz numa menor área em contacto por unidade de tempo do que a considerada no modelo original. Esta diferença pode ser quantificada através do integral da equação 4.10. A área de intersecção (4.10) é expressa em função da distância  $d$  [m] entre os dois centros de circunferência e do raio das circunferências [m]. A Figura 4.2 ilustra os parâmetros desta equação.

A equação 4.12 calcula o valor de  $N$ , considerando que  $N$  é a altura de um retângulo sobre o gráfico da Figura 4.3, de  $A_i(d)$ , com a mesma área do seu integral e com a largura correspondente aos limites de integração. Esse valor também pode ser convertido em percentagem, considerando que a área de uma circunferência de raio  $R$  corresponde a 100% de intersecção. Em suma, estima-se que o contacto real entre as circunferências é equivalente a um contacto total durante 42.4% do tempo de intersecção total.

$$A_i(d) = 2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{|d|}{2R}\right) - \frac{|d|}{2} \sqrt{4R^2 - |d|^2} \quad (4.10)$$

$$\int_{-2R}^{2R} A_i(d) d_d = \frac{16}{3} \times R^3 \quad (4.11)$$

$$N \times 4R = \frac{16}{3} \times R^3 \Leftrightarrow N = \frac{4 \times R^2}{3} \quad (4.12)$$

$$\pi \times R^2 - 100\%$$

$$\frac{4 \times R^2}{3} - x\%$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{4 \times R^2}{3 \times \pi \times R^2} \times 100\%$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{4}{3 \times \pi} \% \approx 42,44\%$$

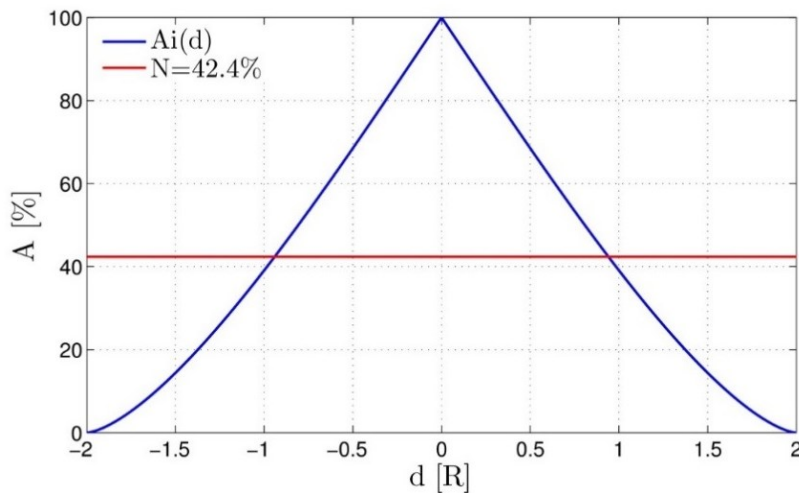


Figura 4.3 – Gráfico da percentagem de área intersectada vs. distância (em raios de circunferência) entre os centros. A  $2R$  a percentagem de intersecção é nula, a  $R$  é de 39.1% e quando os centros se sobrepõem é de 100%.

Por fim, é possível deduzir o modelo em ordem à velocidade de avanço, nas equações 4.13 e 4.14. Para efeitos de comparação apresenta-se o modelo original, deduzido em [7] na equação 4.15.

$$\Delta T = \frac{32 \cdot N \cdot I^2 \cdot \rho_{el}(\Delta T)}{\pi^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \phi^3 \cdot v_x} \quad (4.13)$$

$$\Delta T = \frac{32 \cdot N \cdot I^2 \cdot \rho_0}{\pi^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \phi^3 \cdot v_x - 32 \cdot N \cdot I^2 \cdot \rho_0 \cdot \alpha} \quad (4.14)$$

$$\Delta T^* = \frac{16 \cdot I^2 \cdot \rho_0}{\pi^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \phi^3 \cdot v_x} \quad (4.15)$$

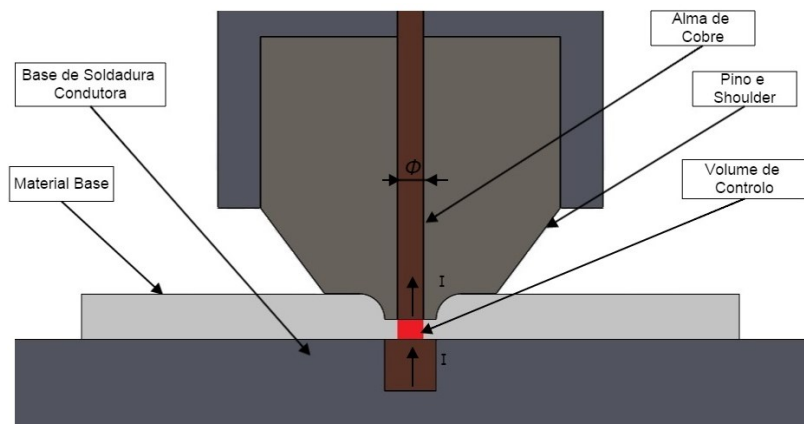


Figura 4.4 – Volume de controlo no processo de SFL.

Salienta-se que a dada altura, com o aumento gradual da intensidade de corrente elétrica, o gráfico da Figura 4.5, correspondente à equação 4.16, mostra uma assíntota para cada material analisado. Isto deve-se ao fator negativo do denominador estar em constante aumento e o fator positivo manter-se constante para as mesmas condições de ensaio. Quanto maior for o fator positivo, maior tem de ser a intensidade de corrente para se obterem as assíntotas. Estas assíntotas não têm significado físico no processo e são consequência do modelo matemático. Os gráficos das Figuras 4.5 a 4.10 baseiam-se nas propriedades mecânicas dos materiais da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades do cobre e ligas de alumínio a 25°C [33].

Material	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ele}$ ( $\Omega \cdot m$ )	$c$ (J/Kg°C)	$T_{fusão}$ (°C)
Cobre	8930	1,70E-08	385	1083,2
AA 2xxx	2780	4,91E-08	873	585
AA 6xxx	2700	3,78E-08	893	623
AA 7xxx	2810	4,48E-08	888	578

Apesar deste modelo ter sido desenvolvido com a abordagem tecnológica #1 em mente, é aplicável em todas as outras, bastando para isso alterar as áreas de contacto entre os materiais condutores da ferramenta e o material base.

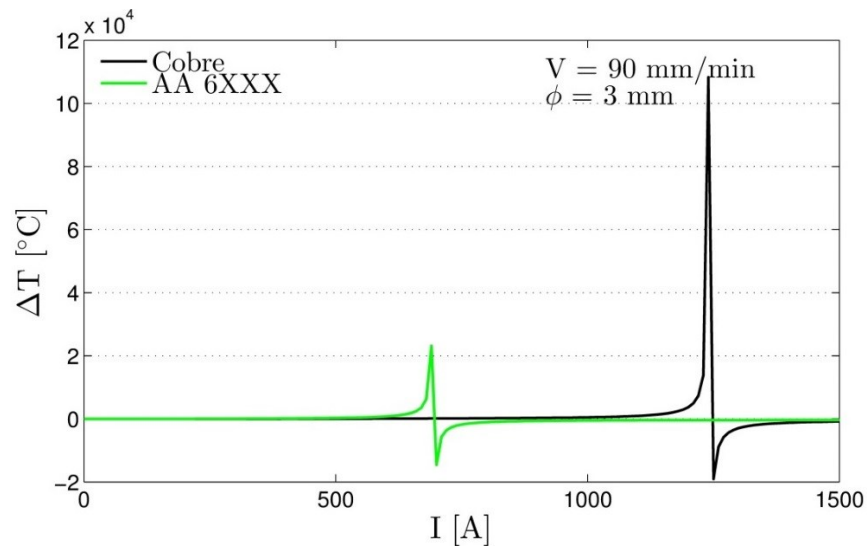


Figura 4.5 – Gráfico das assíntotas da equação 4.14 para o cobre e liga de alumínio de série 6000. Dado que a densidade do cobre é superior à do alumínio, a sua assíntota aparece para um valor maior de intensidade de corrente elétrica.

De forma a analisar ambos os modelos, as suas equações são comparadas em conjunto, para o cobre e liga de alumínio de série 6xxx, nos gráficos da Figura 4.6 e Figura 4.7. As curvas correspondentes ao modelo original são assinaladas na legenda com asterisco [\*].

O comportamento do cobre e das ligas de alumínio da Tabela 4.2 para ambos os modelos e à mesma velocidade é apresentado nos gráficos da Figura 4.7 e Figura 4.9.

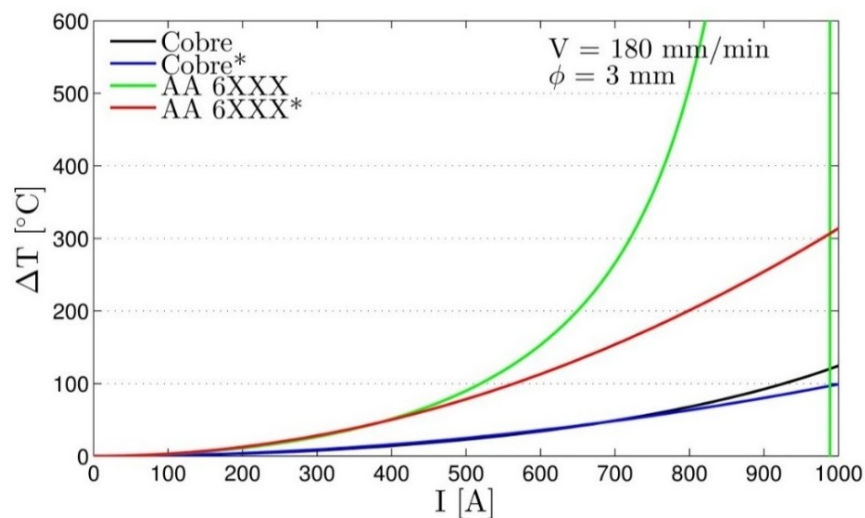


Figura 4.6 – Gráfico das variações de temperatura para os dois modelos. Velocidade de avanço de 180 mm/min.

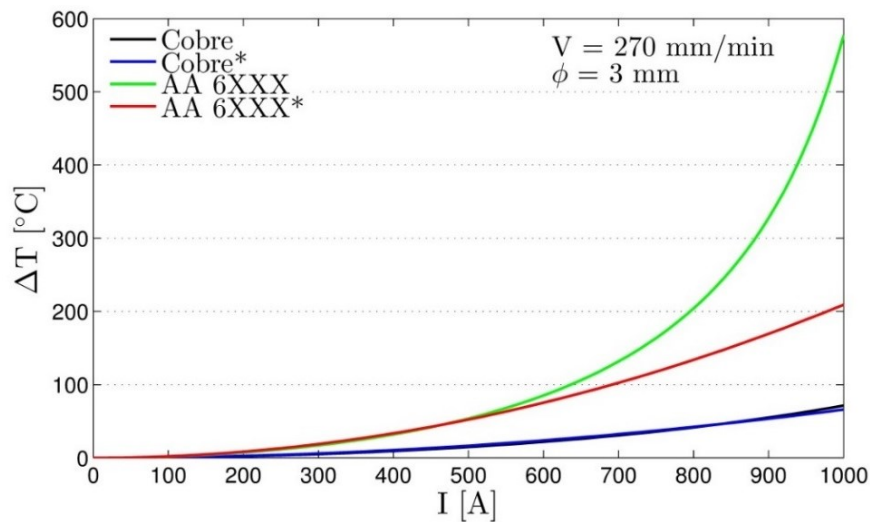


Figura 4.7 – Gráfico das variações de temperatura para os dois modelos. Velocidade de avanço de 270 mm/min.

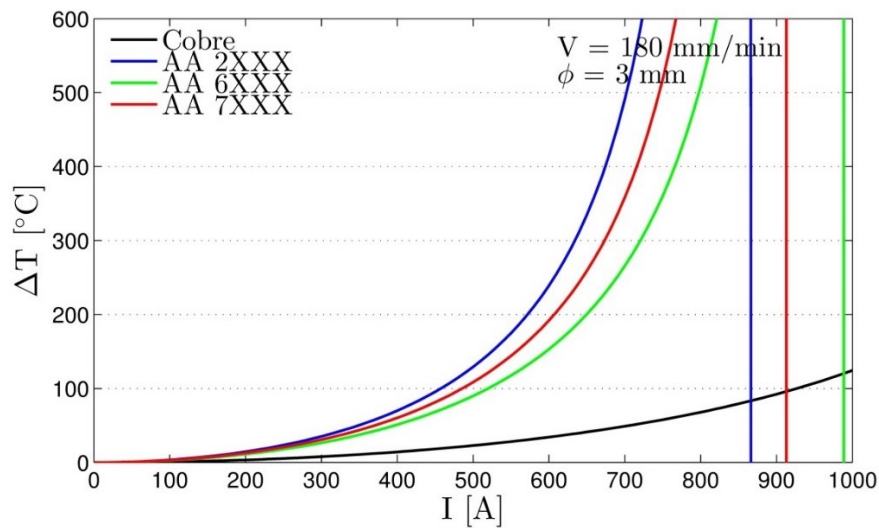


Figura 4.8 – Gráfico da variação de Temperatura vs. Intensidade de Corrente para o novo modelo. Velocidade de avanço de 180 mm/min.

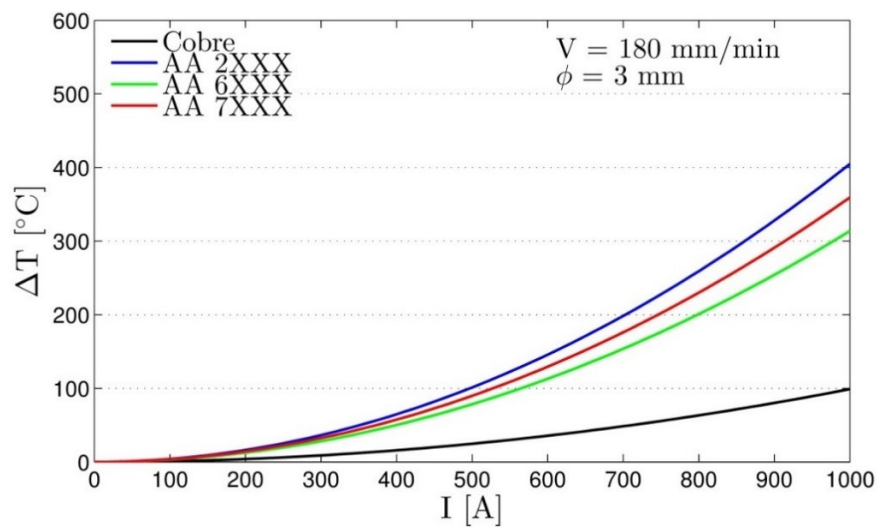


Figura 4.9 – Gráfico da variação de Temperatura vs. Intensidade de Corrente para o modelo original. Velocidade de avanço de 180 mm/min.

Comparando os dois modelos, observa-se em ambos que apenas o diâmetro do pino tem influência na variação da temperatura: o seu comprimento não é termo da equação final do modelo teórico. A variação de temperatura aumenta juntamente com a intensidade de corrente elétrica e baixa com aumentos de velocidade e de diâmetro do pino da ferramenta. Segundo o novo modelo, o aumento de temperatura é mais acentuado do que o previsto inicialmente pelo modelo original.

## 4.3 Simulações Numéricas

### 4.3.1 Modelos Desenvolvidos

A simulação numérica computacional é uma ferramenta interessante para fornecer estimativas do fluxo e densidade de corrente no material base e na ferramenta de soldadura. Para a simulação, utilizou-se um módulo do *software* de elementos finitos CST STUDIO. O CST EM STUDIO permite analisar problemas eletrostáticos, magnetostáticos, de corrente estacionária e de aparelhos de baixa frequência.

Com o *software*, foram redesenhados seis modelos de geometria simplificada, um para cada combinação de abordagem tecnológica e base de soldadura. Estes modelos simplificados são compostos por material base, ferramenta e base de soldadura. Os modelos criados têm uma malha hexaédrica de 12 a 30 milhões de elementos. Estes elementos de malha têm dimensões variáveis, diferentes conforme a zona de que fazem parte, resultando numa malha mais refinada nas zonas consideradas críticas, tais como nas zonas de elevada densidade de corrente (Figura 4.10). Sendo um programa de elementos finitos, a exatidão da solução pode ser melhorada aumentando o número de elementos de malha, que por sua vez aumenta o tempo de simulação. O *solver* selecionado para a simulação foi o *Stationary Current Solver*, indicado para problemas de correntes estacionárias.

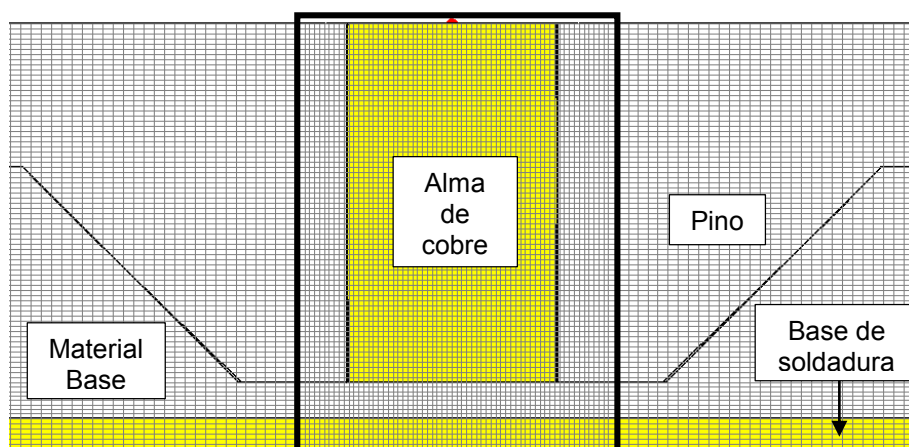


Figura 4.10 – Detalhe da malha. A zona no retângulo é considerada crítica e possui a malha mais refinada do modelo.

Das simulações efetuadas, retiraram-se os resultados referentes à distribuição e densidade de corrente elétrica nos diferentes materiais. Os resultados são apresentados pelas figuras de distribuição de corrente elétrica e densidade de corrente no modelo, no eixo de simetria YZ e na superfície da base de soldadura. Para cada variação das abordagens tecnológicas, são apresentados dez gráficos que traçam perfis da densidade de corrente elétrica pelos componentes do modelo: seis baseados em retas horizontais traçadas ao longo do comprimento do MB, contidas entre este e a base inferior do pino; três baseados em retas verticais traçadas ao centro do pino, no seu limite e a meia distância entre os dois; e um baseado numa reta horizontal que interseja material base e pino. Todos os modelos simularam a passagem de 1000 A pela ferramenta e material base.

### 4.3.2 Abordagem Tecnológica #1

Duas simulações foram baseadas na primeira abordagem tecnológica: uma para a soldadura utilizando uma base de aço e outra utilizando uma base de mármore. Nos modelos geométricos reduziram-se as dimensões das bases de soldadura e materiais a soldar. A ferramenta de fricção linear tem a geometria do pino simplificada. Desta forma, criaram-se dois modelos simplificados capazes de serem calculados mais rapidamente sem perder o significado físico do que se pretende simular.

O primeiro modelo corresponde à combinação da abordagem tecnológica #1 com a base de soldadura em aço com um filamento de cobre no seu eixo de simetria. A Figura 4.11 ilustra este modelo e a Tabela 4.3 resume algumas das suas características.

Tabela 4.3 - Detalhes do modelo geométrico AT1-B1.

Malha	Nº de elementos = 24 750 384		
Shoulder	$\Phi = 20$ mm		
Pino	$\Phi = 6$ mm L = 3 mm		
Material Base	L = 54 mm	W = 40 mm	t = 3.5 mm
Base de Soldadura	L = 64 mm	W = 40 mm	t = 10.5 mm

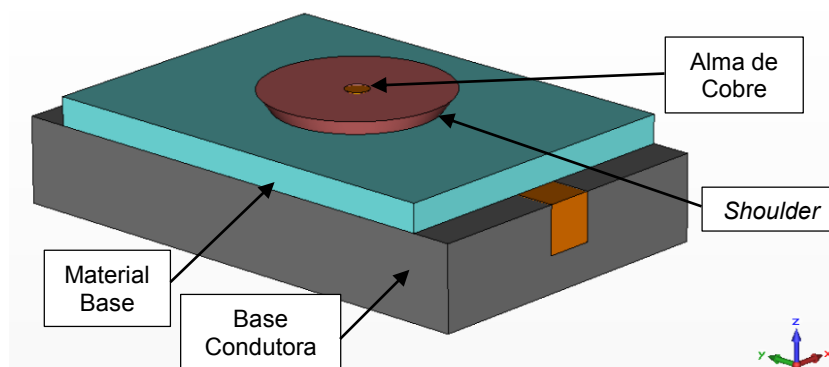


Figura 4.11 – Modelo geométrico AT1-B1.

Os resultados correspondentes à densidade de corrente elétrica são ilustrados da Figura 4.12 à Figura 4.15. A densidade de corrente é representada em Ampere por metro quadrado ( $A/m^2$ ).

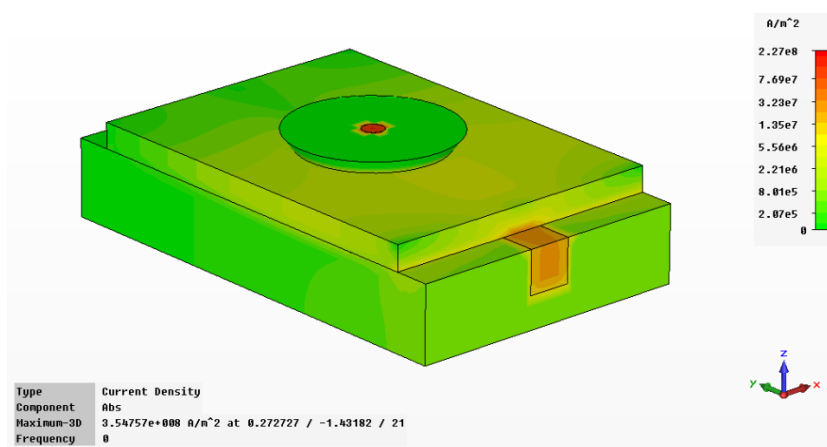


Figura 4.12 – Densidade de corrente em AT1-B1 para valores absolutos.

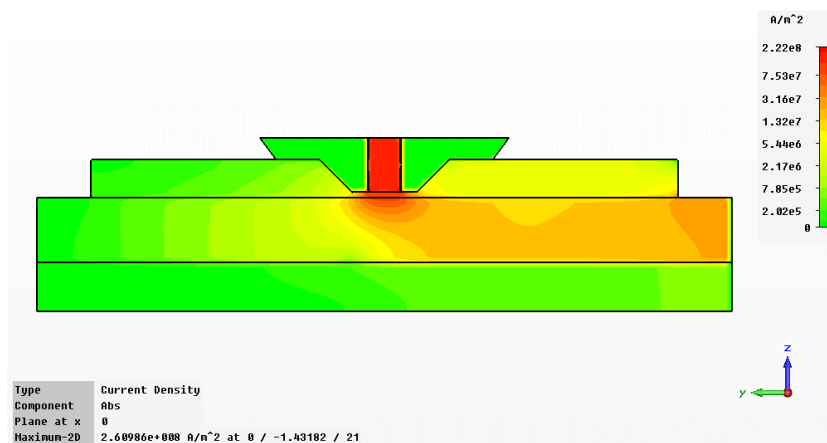


Figura 4.13 – Densidade de corrente em AT1-B1, corte em YZ, no eixo de simetria.

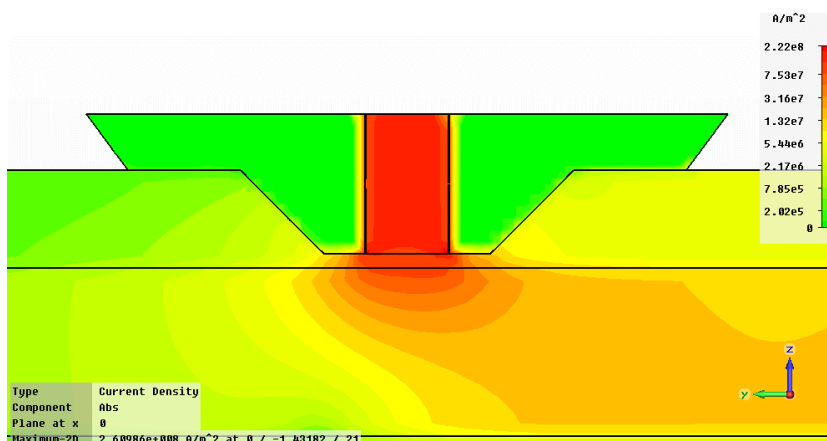


Figura 4.14 – Detalhe da densidade de corrente em AT1-B1, corte em YZ, no eixo de simetria.



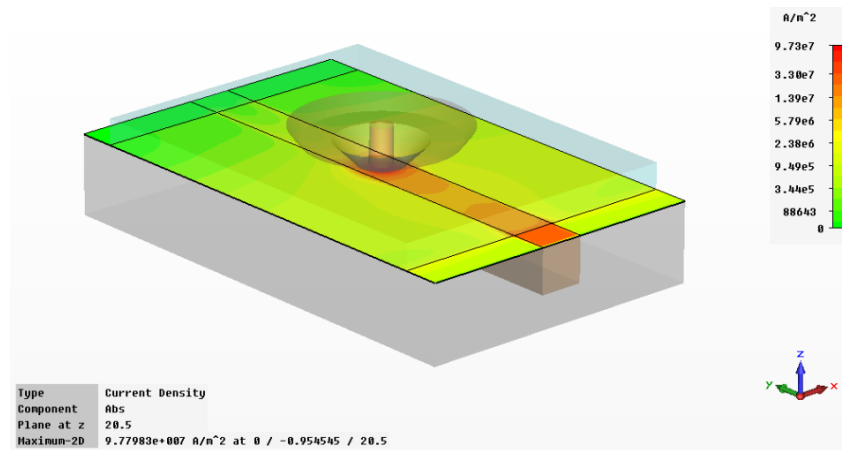


Figura 4.15 – Densidade de corrente em AT1-B1, corte em XY, na superfície da base de soldadura.

As retas nas quais os gráficos de variação de densidade de corrente se baseiam estão representadas na Figura 4.16. Nesta ilustração, na superfície de cobre (laranja), de baixo para cima, estão representadas num intervalo de meio milímetro seis retas. Acima destas está uma reta que atravessa material base e ferramenta. Na vertical, há uma reta no eixo de simetria do modelo. A esta, seguem-se mais duas retas. Estas retas são iguais para os modelos com base de aço e base de mármore.

Os gráficos apresentados nas figuras seguintes representam no eixo XX a distância em milímetros e no eixo YY a densidade de corrente em ampere por metro quadrado.

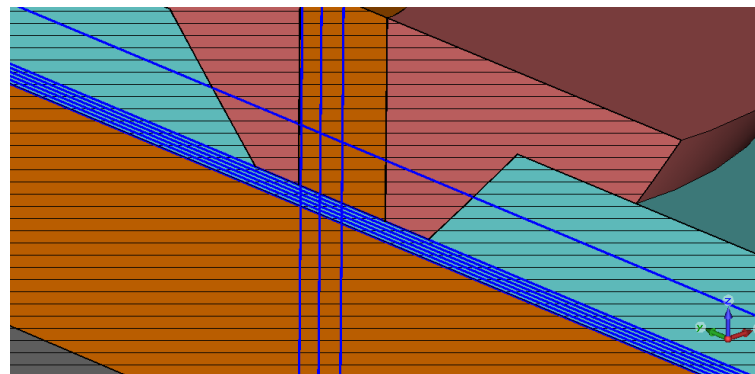


Figura 4.16 – Retas consideradas para os gráficos de densidade de corrente nos modelos da AT1.

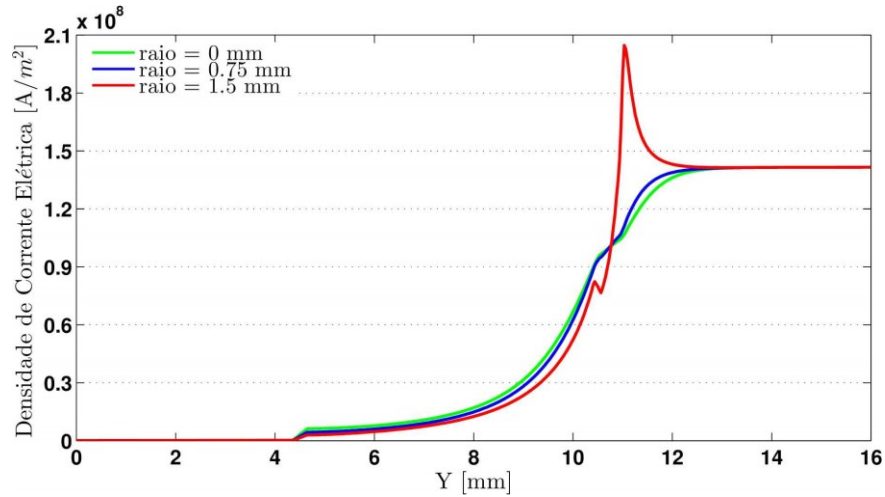


Figura 4.17 – Densidade de corrente na vertical para o modelo AT1-B1.

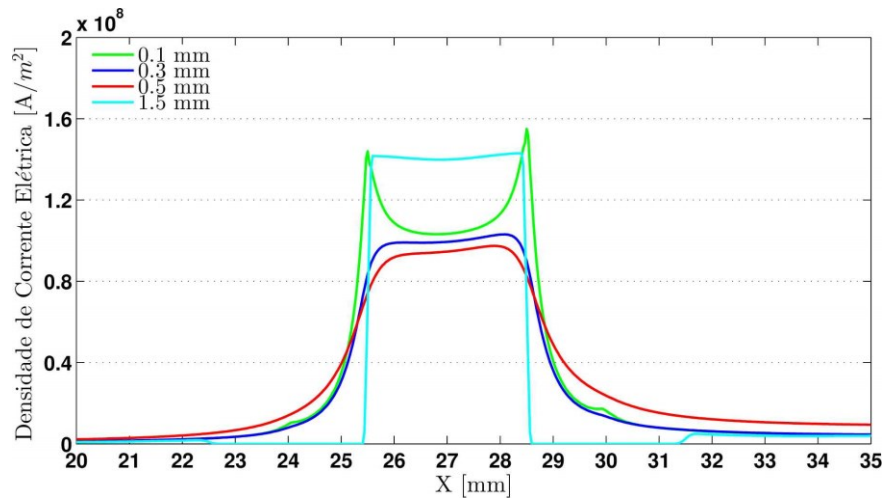


Figura 4.18 – Densidade de corrente na horizontal para o modelo AT1-B1.

Para a vertente desta abordagem tecnológica com a base de soldadura de mármore, designado AT1-B2, apresentam-se os mesmos elementos de análise. Salienta-se que nesta abordagem tecnológica o MB é ligado diretamente à fonte de corrente elétrica e que neste modelo, essa ligação é representada por um paralelepípedo de cobre, de cor laranja. Esta condição é válida para todas as ATs com base de soldadura isolante. A Figura 4.19 ilustra o modelo e a Tabela 4.4 resume algumas características. Os resultados referentes à densidade de corrente são ilustrados da Figura 4.20 à Figura 4.23. Por fim, os gráficos da Figura 4.24 e da Figura 4.25 exprimem a diferença de densidade de corrente para as retas traçadas nesta abordagem tecnológica.

Tabela 4.4 – Detalhes do modelo geométrico AT1-B2.

Malha	Nº de elementos = 22 269 520		
Shoulder	$\Phi = 20$ mm		
Pino	$\Phi = 6$ mm	L = 3 mm	
Material Base	L = 54 mm	W = 40 mm	t = 3.5 mm
Base de Soldadura	L = 64 mm	W = 40 mm	t = 10.5 mm

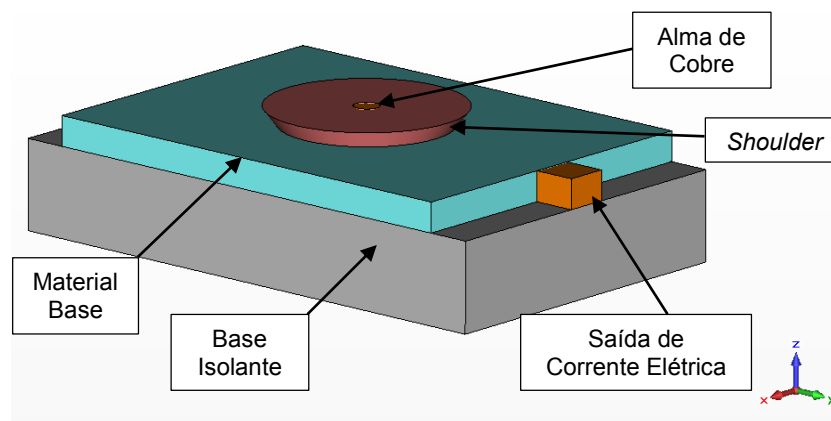


Figura 4.19 – Modelo geométrico AT1-B2.

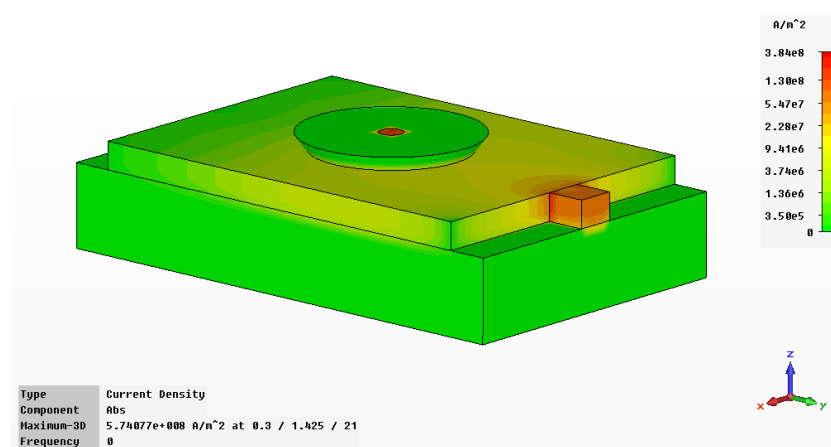


Figura 4.20 – Densidade de corrente em AT1-B2 para valores absolutos.

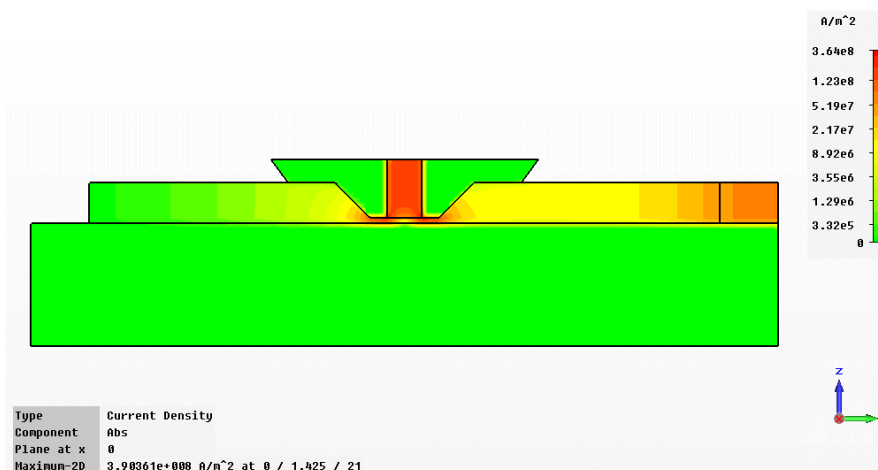


Figura 4.21 – Densidade de corrente em AT1-B2, corte em YZ, no eixo de simetria.

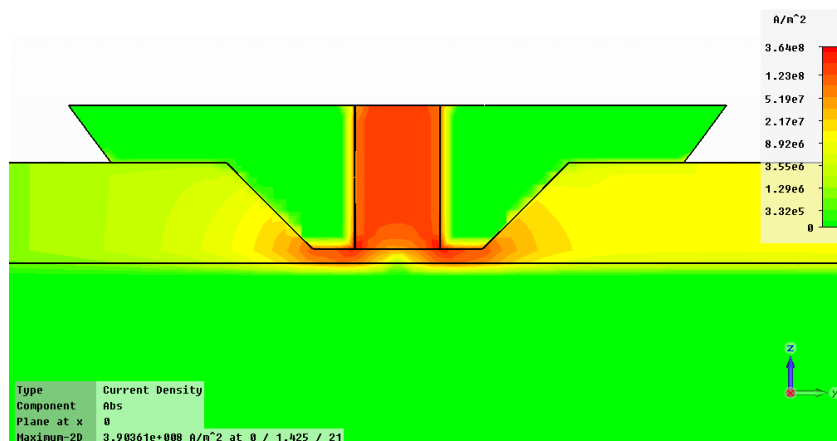


Figura 4.22 – Detalhe da densidade de corrente em AT1-B2, corte em YZ, no eixo de simetria.

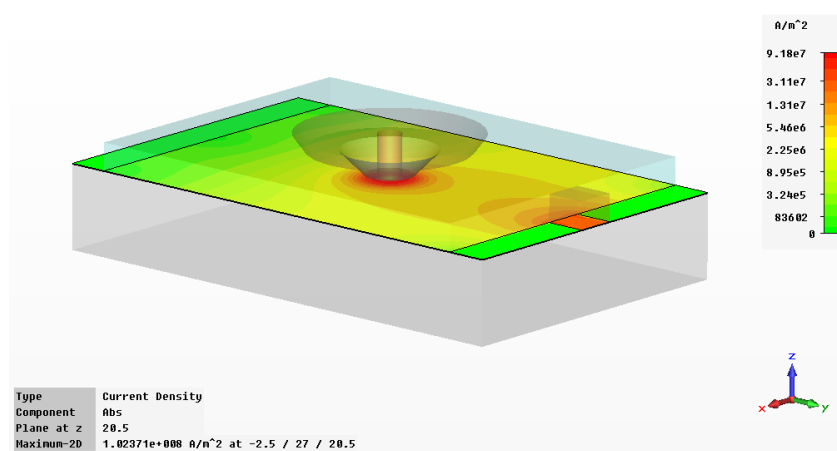


Figura 4.23 – Densidade de corrente em AT1-B2, corte em XY, na superfície da base de soldadura.

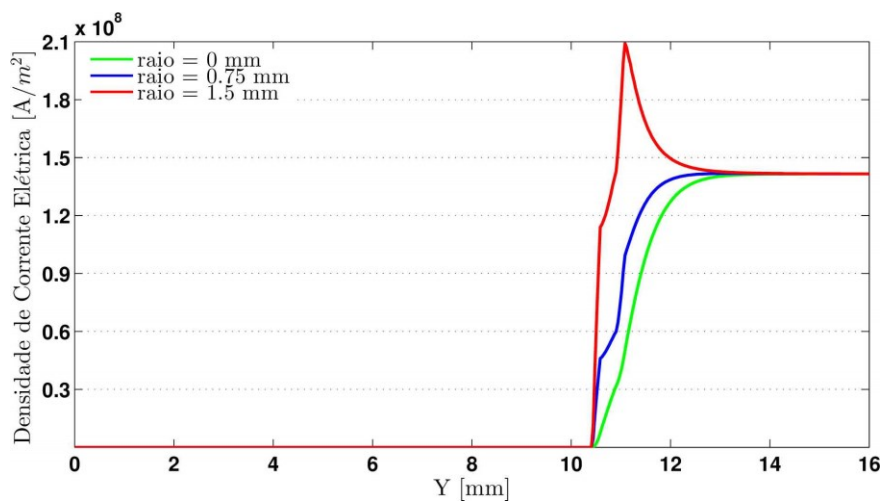


Figura 4.24 – Densidade de corrente na vertical para o modelo AT1-B2.

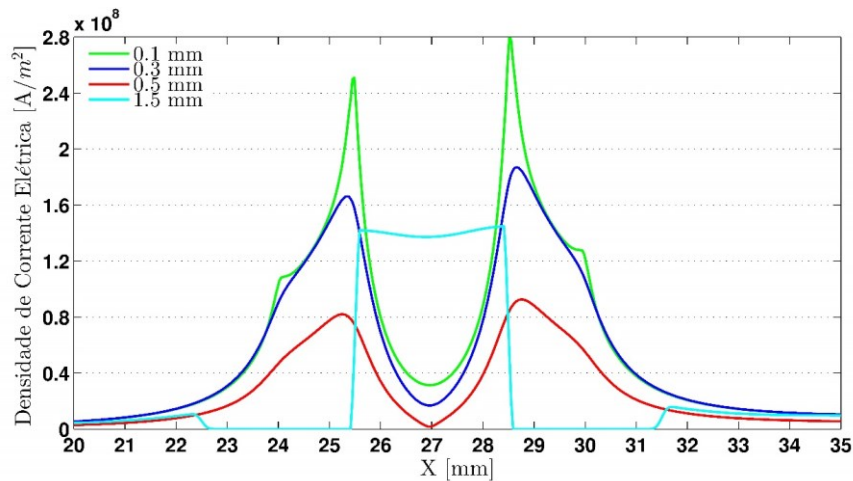


Figura 4.25 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT1-B2.

No modelo da AT1-B1 observou-se a maior densidade de corrente elétrica ( $0.7$  a  $21 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup>) na zona da raiz do MB abaixo do pino. Para a variante com a base de mármore (AT1-B2), observou-se que a corrente é mais densa à volta da alma de cobre do que abaixo dela ( $0.15$  a  $21 \cdot 10^8$  A/m<sup>2</sup>), ao contrário do que acontece em AT1-B1. Este acontecimento deve-se à existência do filamento de cobre na base de aço que faz com que a corrente penetre com alta densidade a zona da junta do MB.

### 4.3.3 Abordagem Tecnológica #2

Com base na segunda abordagem tecnológica criaram-se dois modelos geométricos simplificados, usados nas simulações da passagem de corrente elétrica. Nestes modelos, as dimensões da chapa e base de soldadura não correspondem à realidade. Uma redução de volume foi aplicada a esses componentes para reduzir a quantidade de elementos do modelo projetado, sem influenciar de forma crucial os resultados da simulação. A Figura 4.26 representa o modelo e a Tabela 4.5 descreve algumas das características desta simulação.

Tabela 4.5 - Detalhes do modelo geométrico AT2-B1

Malha	Nº de elementos = 35 057 520		
Shoulder	$\Phi = 16$ mm		
Pino	$\Phi = 5$ mm	L = 3 mm	
Material Base	L = 54 mm	W = 40 mm	t = 3.5 mm
Base de Soldadura	L = 64 mm	W = 40 mm	t = 10.5 mm

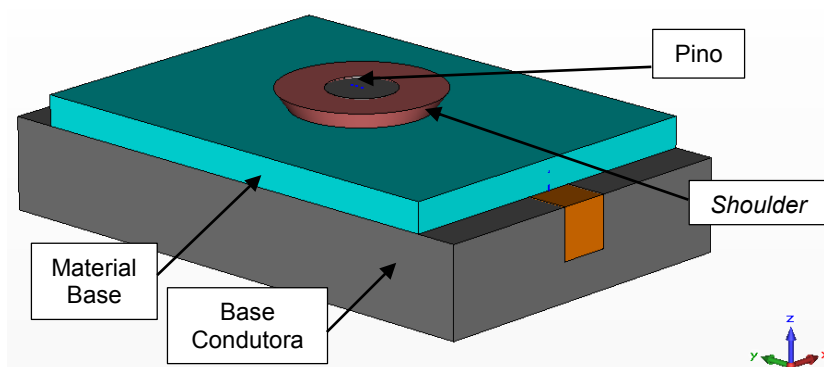


Figura 4.26 – Modelo geométrico AT2-B1.

Da Figura 4.27 à 4.32, é ilustrada a densidade de corrente elétrica para todo o modelo e para dois planos de corte, um no eixo de simetria do modelo e o outro na superfície da base de soldadura.

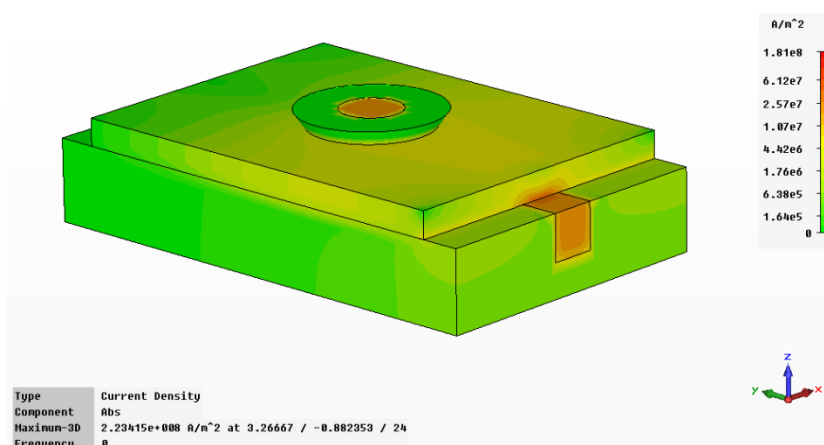


Figura 4.27 – Densidade de corrente elétrica em AT2-B1 para valores absolutos.

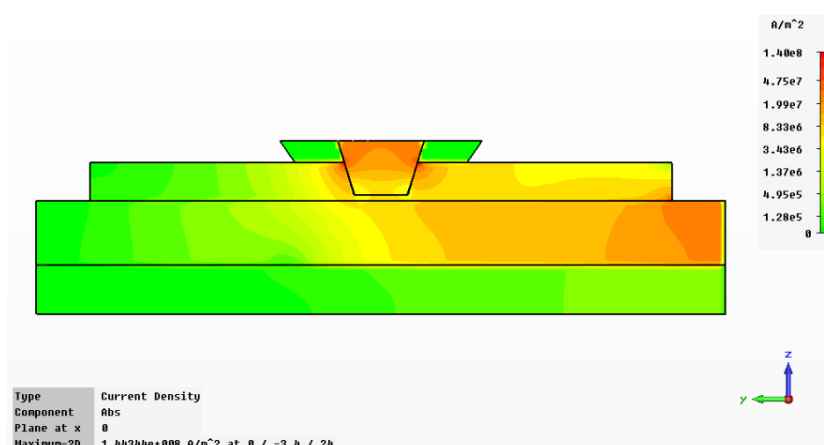


Figura 4.28 – Densidade de corrente elétrica em AT2-B1, corte em YZ.

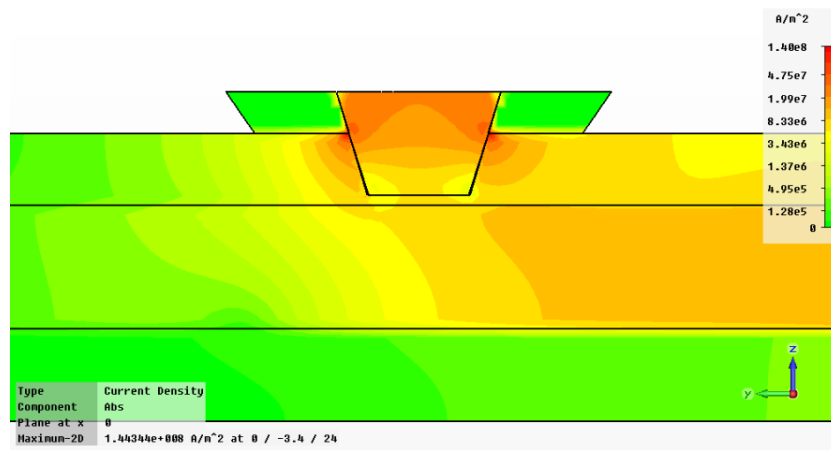


Figura 4.29 – Detalhe da densidade de corrente elétrica em AT2-B1, corte em YZ.

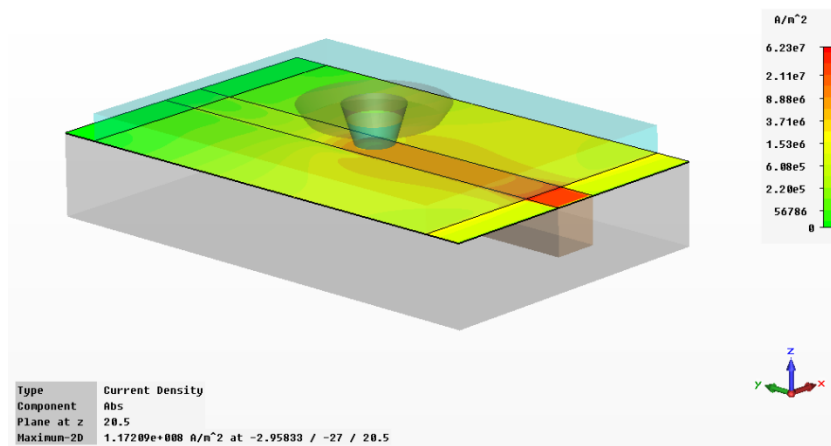


Figura 4.30 – Densidade de corrente em AT2-B1, corte no eixo XY.

Os gráficos que exprimem as variações de densidade de corrente elétrica são apresentados na figura Figura 4.32 à Figura 4.33. Estes baseiam-se nas retas representadas pela Figura 4.31, dispostas tal como descrito em § 4.3.2.

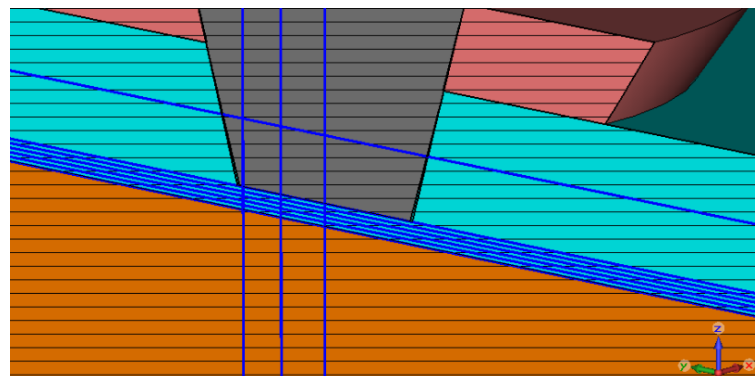


Figura 4.31 – Retas consideradas para os gráficos de densidade de corrente da AT2.

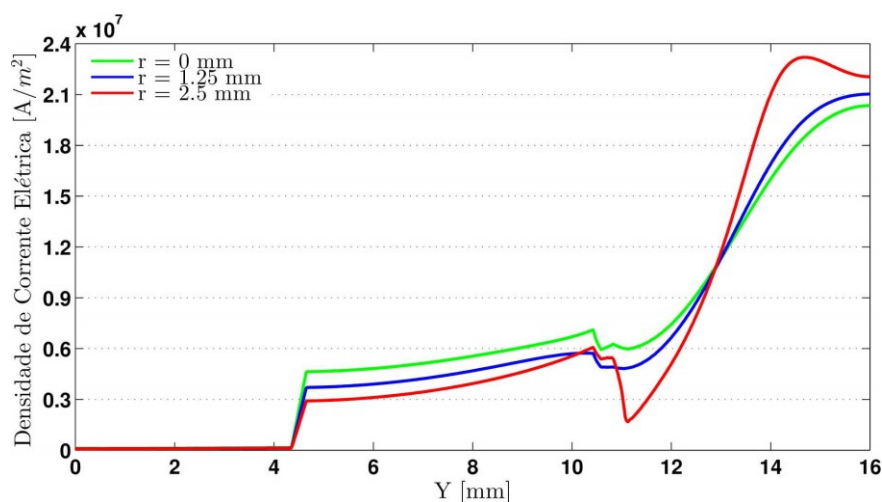


Figura 4.32 – Densidade de corrente elétrica na vertical para o modelo AT2-B1.

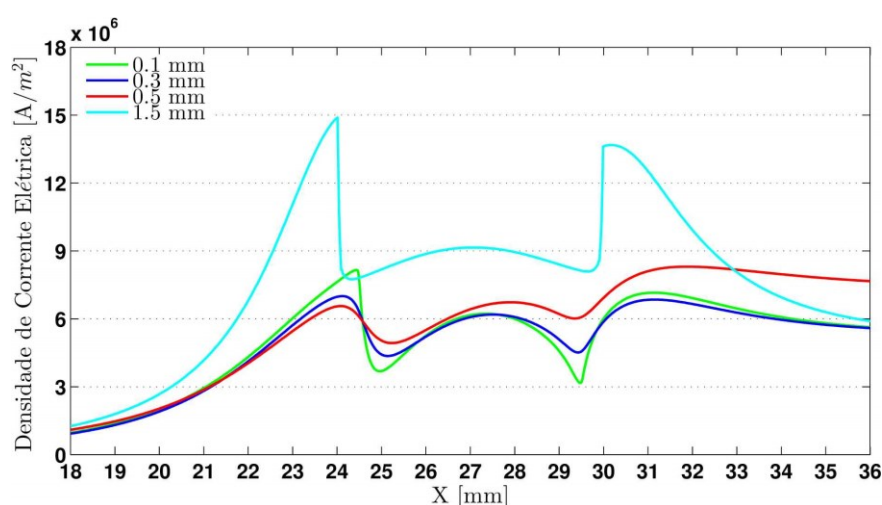


Figura 4.33 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT2-B1.

A simulação desta abordagem tecnológica na base de soldadura isolante apresenta-se na Figura 4.34, que representa o modelo, e na Tabela 4.6, que descreve algumas das características desta simulação. Da Figura A.0.4 à Figura 4.38, apresenta-se a distribuição de corrente elétrica e a sua densidade.

Tabela 4.6 – Detalhes do modelo geométrico AT2-B2

Malha	Nº de elementos = 25 812 992		
<i>Shoulder</i>	$\Phi = 16$ mm		
Pino	$\Phi = 5$ mm	L = 3 mm	
Material Base	L = 54 mm	W = 40 mm	t = 3.5 mm
Base de Soldadura	L = 64 mm	W = 40 mm	t = 10.5 mm



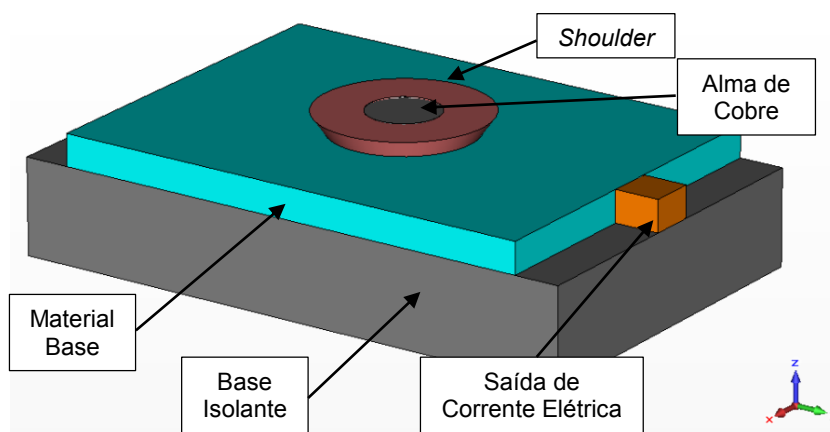


Figura 4.34 – Modelo geométrico AT2-B2.

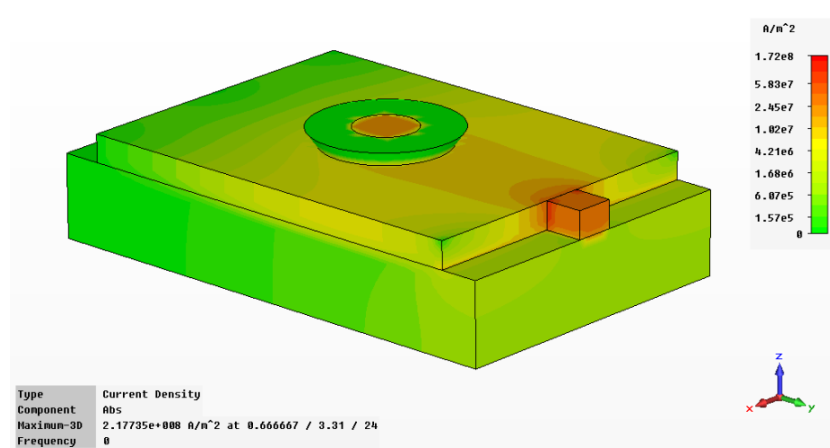


Figura 4.35 – Densidade de corrente em AT2-B2 para valores absolutos.

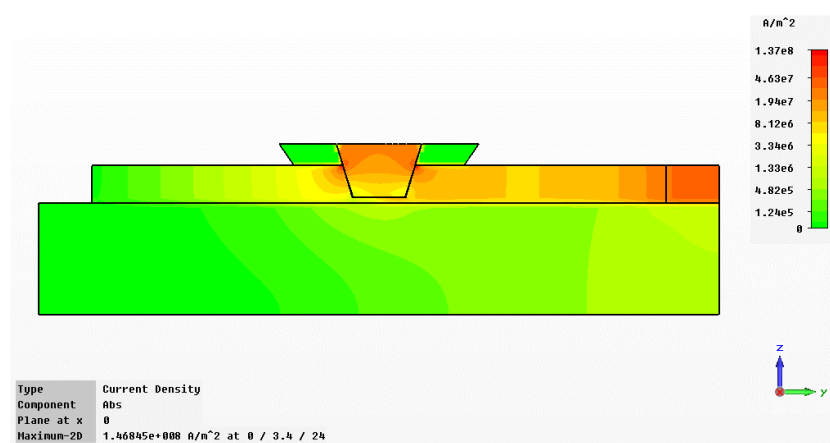


Figura 4.36 – Densidade de corrente em AT2-B2, corte em YZ, no eixo de simetria.

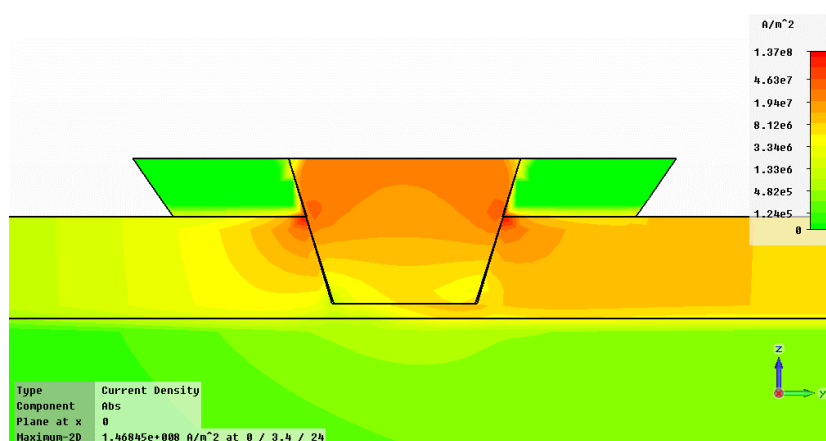


Figura 4.37 – Detalhe da densidade de corrente em AT2-B2, corte em YZ, no eixo de simetria.

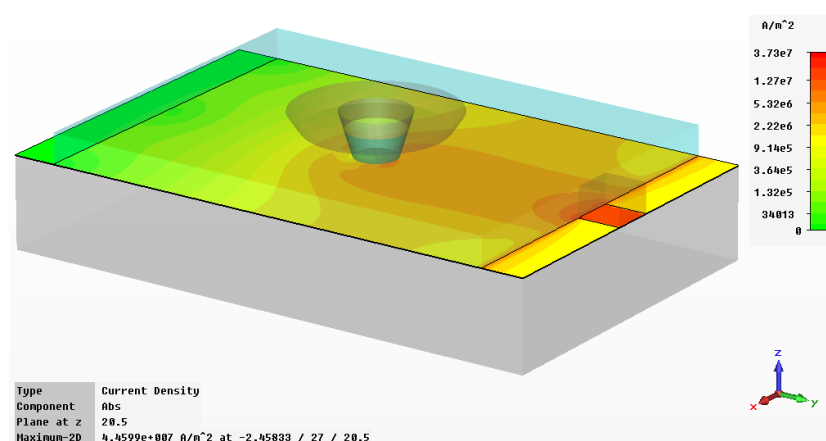


Figura 4.38 – Densidade de corrente em AT2-B2, corte em XY.

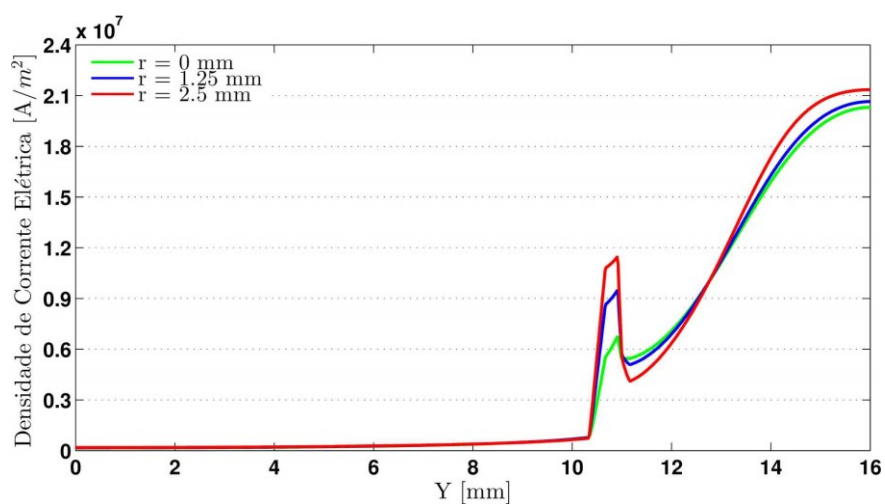


Figura 4.39 – Densidade de corrente na vertical para o modelo AT2-B2.

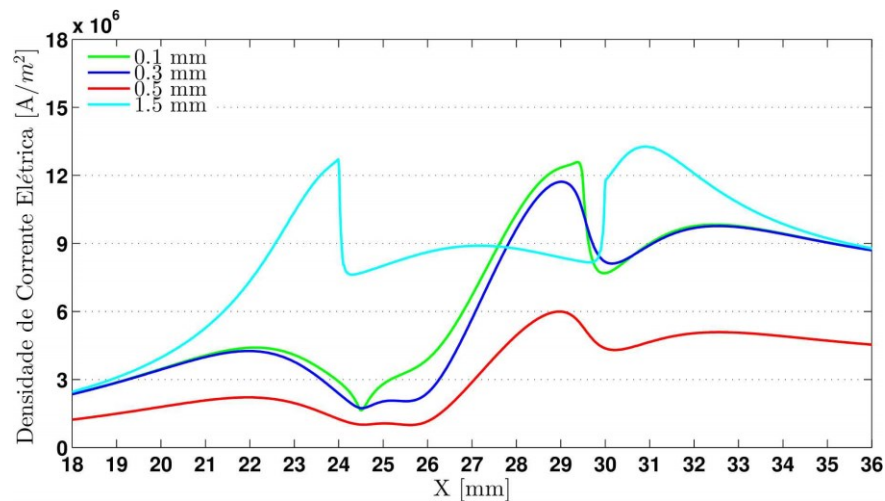


Figura 4.40 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT2-B2.

Nos modelos da AT2, verificou-se que a zona de maior densidade de corrente situa-se constantemente na zona do pino da fronteira entre material base e *shoulder*.

Quanto à zona da raiz do material base, a maior densidade de corrente elétrica é observada no modelo que utiliza a base isolante de mármore (B2). Nesta zona, a AT2-B1 apresenta um intervalo de valores de  $5$  a  $7 \cdot 10^6$  A/m<sup>2</sup> e a AT2-B2 um intervalo de  $6$  a  $12 \cdot 10^6$  A/m<sup>2</sup>, o que equivale a um aumento de densidade de corrente de  $15$  a  $40$  % apenas com a troca das bases de soldadura.

#### 4.3.4 Abordagem Tecnológica #3

As duas simulações baseadas na terceira abordagem tecnológica são aqui apresentadas. Tal como nos casos anteriores, foram usados modelos que simplificam a geometria do sistema ferramenta, material base e base de soldadura, sem influenciar gravemente o significado físico dos resultados das simulações.

A Figura 4.41 mostra o modelo simulado e a Tabela 4.7 resume as características deste. Da Figura 4.42 à Figura 4.45 apresenta-se densidade de corrente elétrica no modelo em valores absolutos para o modelo completo e dois planos de corte.

Tabela 4.7 – Detalhes do modelo geométrico AT3-B1.

Malha	Nº de elementos = 15 904 512		
<i>Shoulder</i>	$\phi = 16$ mm		
Pino	$\phi = 5$ mm	L = 3 mm	
Material Base	L = 54 mm	W = 40 mm	t = 3.5 mm
Base de Soldadura	L = 64 mm	W = 40 mm	t = 10.5 mm

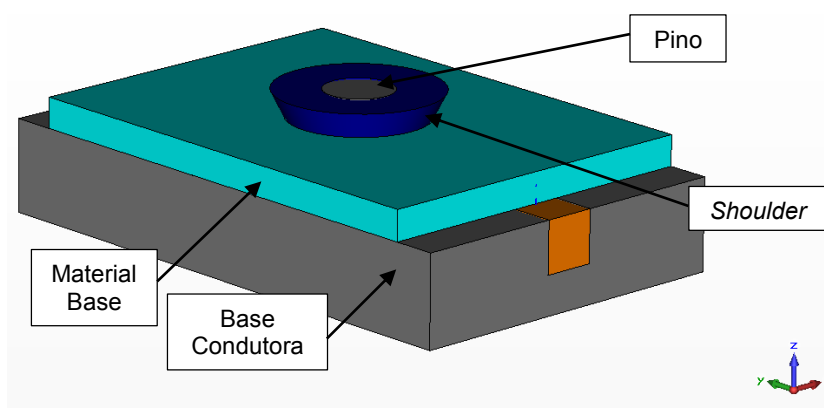


Figura 4.41 – Modelo geométrico de AT3-B1.

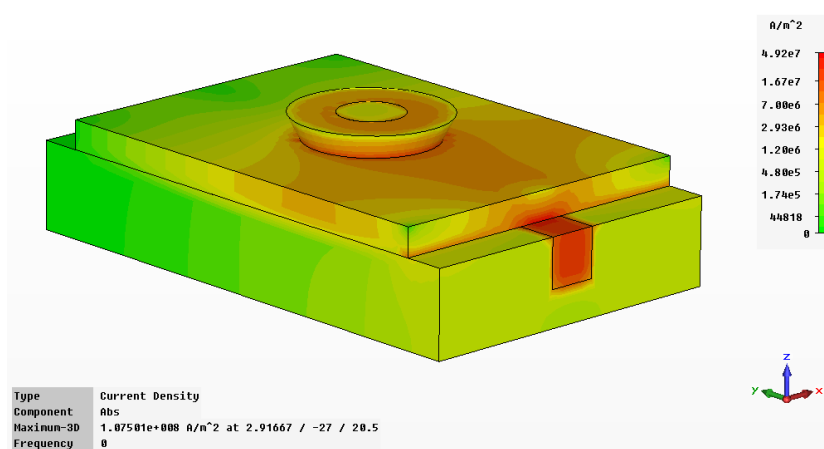


Figura 4.42 – Densidade de corrente em AT3-B1 para valores absolutos.

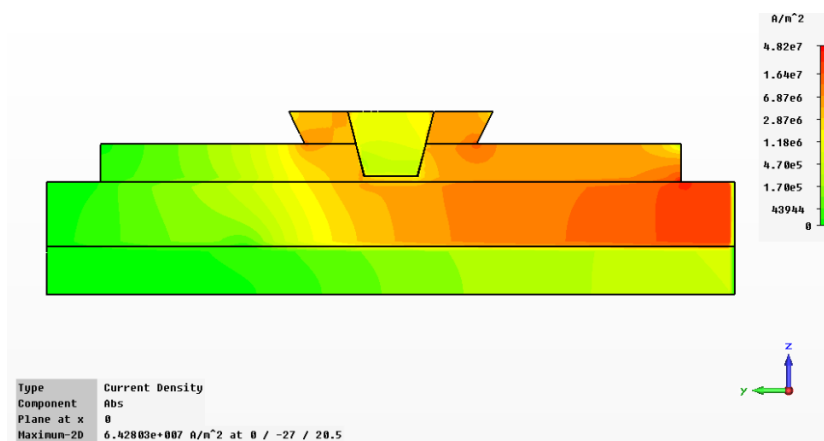


Figura 4.43 – Densidade de corrente em AT3-B1, corte em YZ.

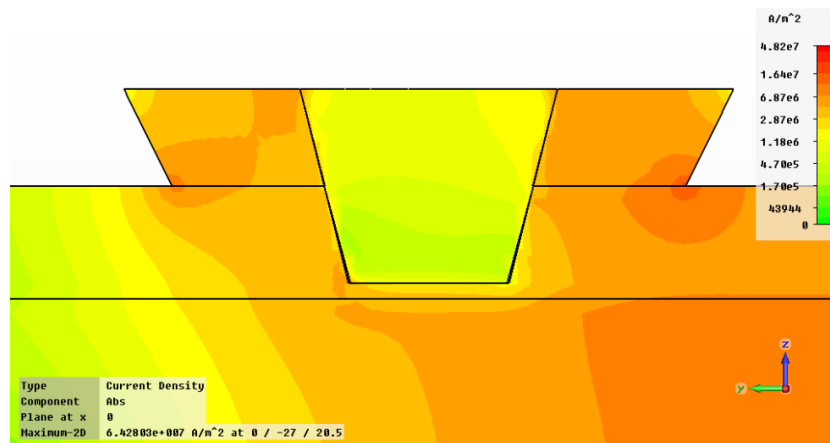


Figura 4.44 – Detalhe da densidade de corrente elétrica em AT3-B1, corte em YZ.

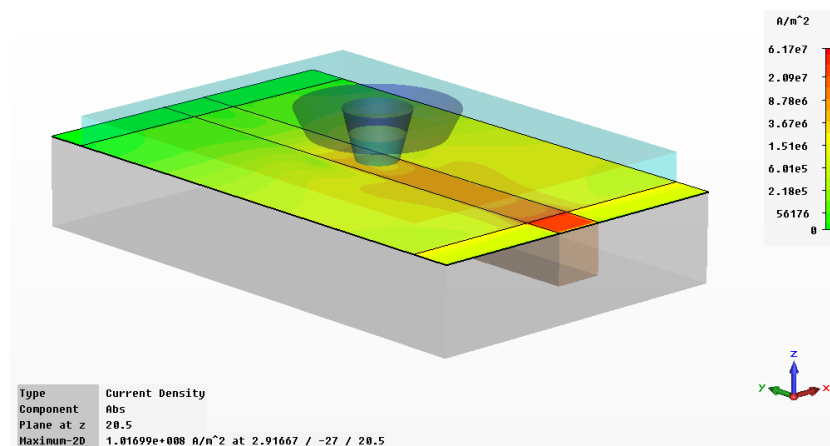


Figura 4.45 – Densidade de corrente em AT3-B1, corte em XY.

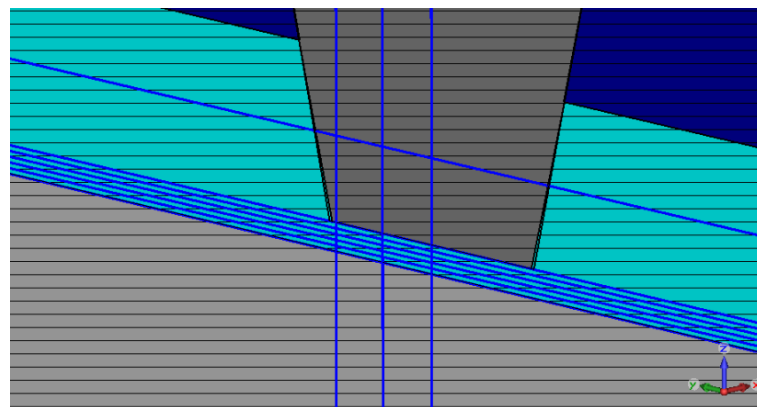


Figura 4.46 – Retas consideradas para os gráficos de densidade de corrente nos modelos da AT3.

Na Figura 4.46, estão representadas as retas nas quais são baseados os gráficos dos perfis de densidade de corrente elétrica do modelo. Estes são mostrados na Figura 4.47 e na Figura 4.48. Tal como descrito em em § 4.3.2, os gráficos correspondem a seis retas horizontais que cobrem a espessura do material base não penetrada, a uma reta horizontal que intersesta

pino e material base e três retas verticais que passam por pino, MB e base de soldadura. As mesmas retas dão origem aos gráficos das duas versões simuladas desta abordagem tecnológica.

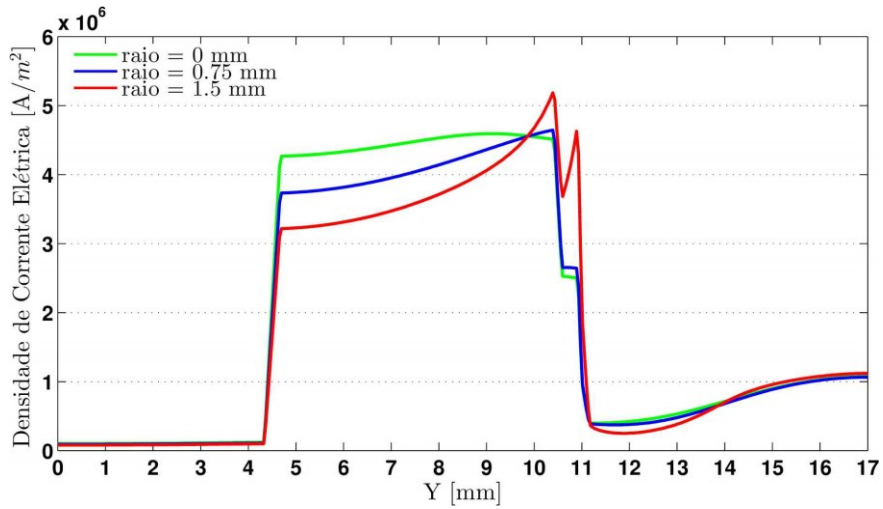


Figura 4.47 – Densidade de corrente elétrica na vertical para o modelo AT3-B1.

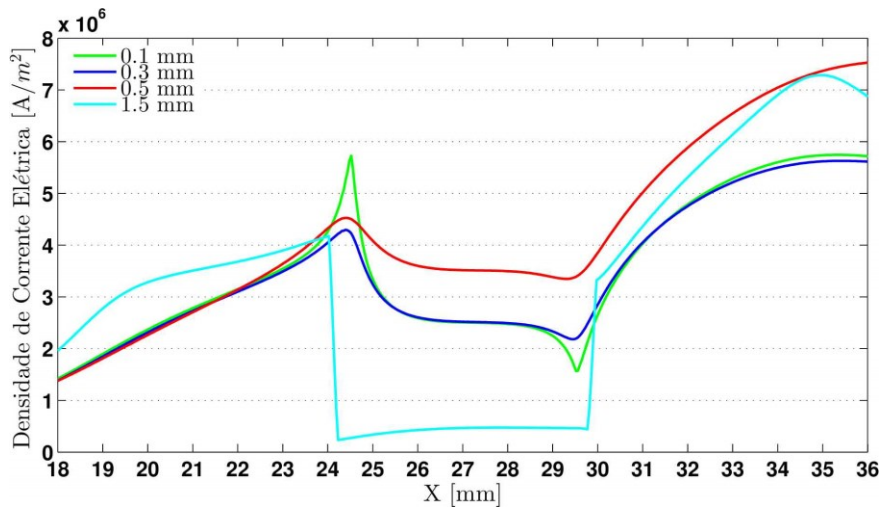


Figura 4.48 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT3-B1.

O produto da simulação do modelo AT3-B2 é apresentado nas seguintes figuras. A Tabela 4.8 compila os detalhes do modelo e a Figura 4.49 ilustra-o. Da Figura 4.50 à Figura 4.53, apresenta-se a densidade de corrente elétrica. Os gráficos de perfis de densidade de corrente elétrica são ilustrados na Figura 4.54 e na Figura 4.55.

Tabela 4.8 – Detalhes do modelo geométrico AT3-B2.

Malha	Nº de elementos = 22 796 316		
Shoulder	$\Phi = 16 \text{ mm}$		
Pino	$\Phi = 5 \text{ mm}$	$L = 3 \text{ mm}$	
Material Base	$L = 54 \text{ mm}$	$W = 40 \text{ mm}$	$t = 3.5 \text{ mm}$
Base de Soldadura	$L = 64 \text{ mm}$	$W = 40 \text{ mm}$	$t = 10.5 \text{ mm}$

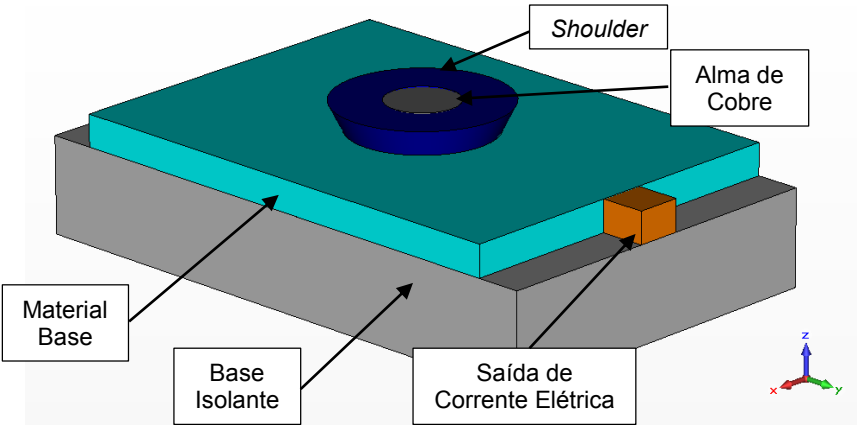


Figura 4.49 – Modelo geométrico AT3-B2.

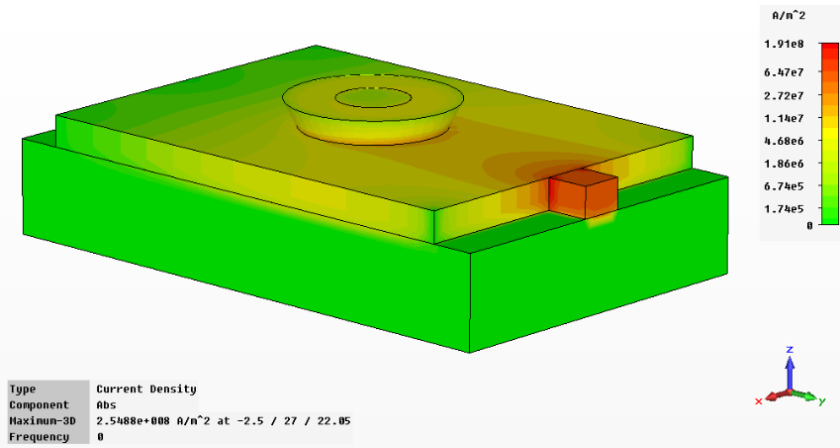


Figura 4.50 – Densidade da corrente elétrica de AT3-B2, em valores absolutos.

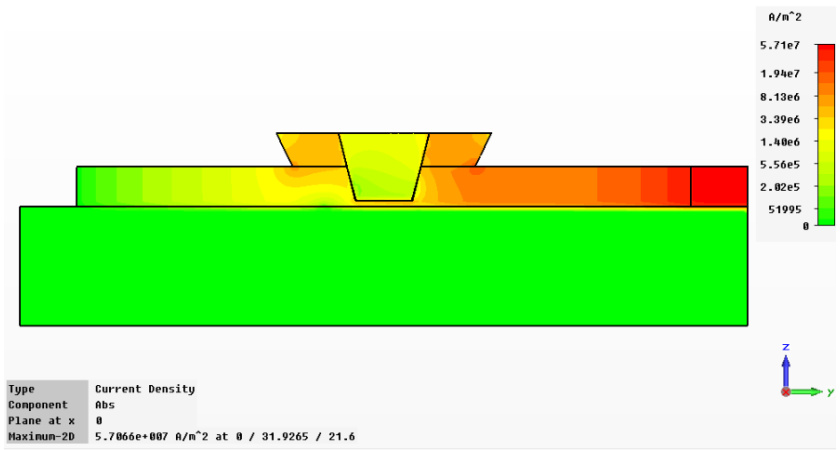


Figura 4.51 – Densidade da corrente elétrica de AT3-B2, corte em YZ.

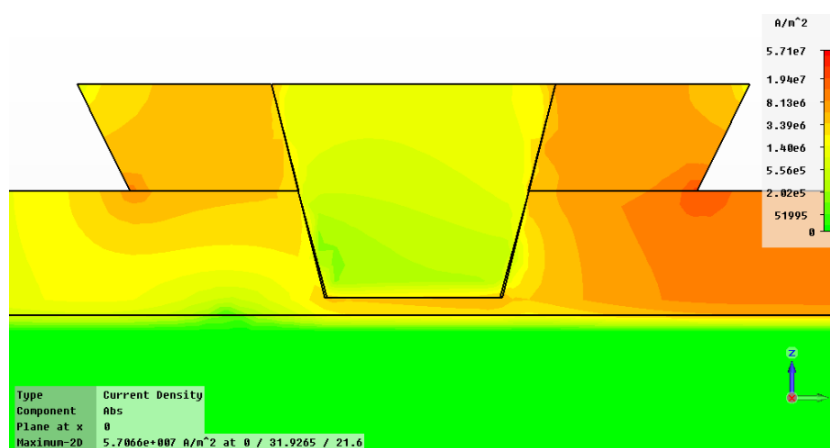


Figura 4.52 – Detalhe da densidade de corrente elétrica de AT3-B2, corte em YZ.

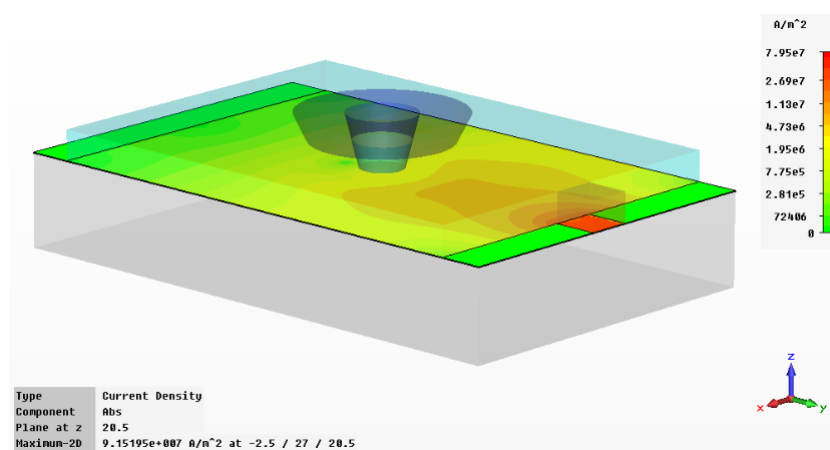


Figura 4.53 – Densidade da corrente elétrica de AT3-B3, corte em XY.

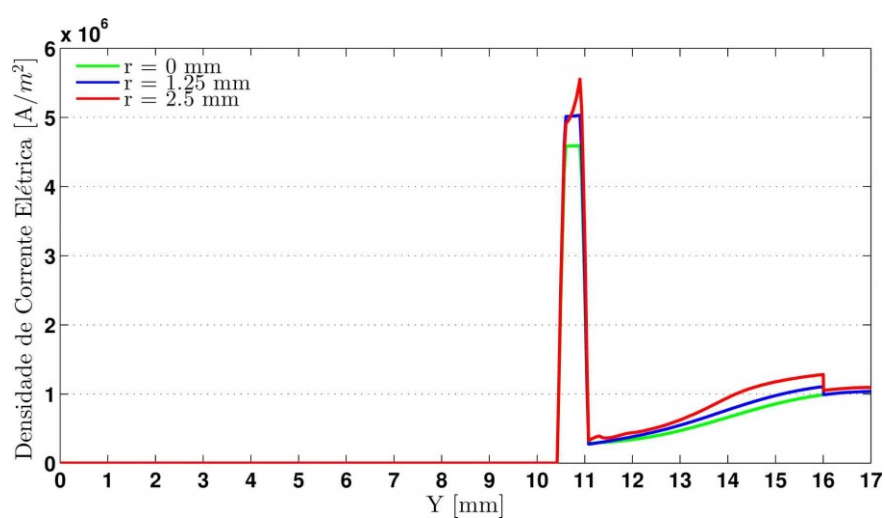


Figura 4.54 – Densidade de corrente elétrica na vertical para o modelo AT3-B2.



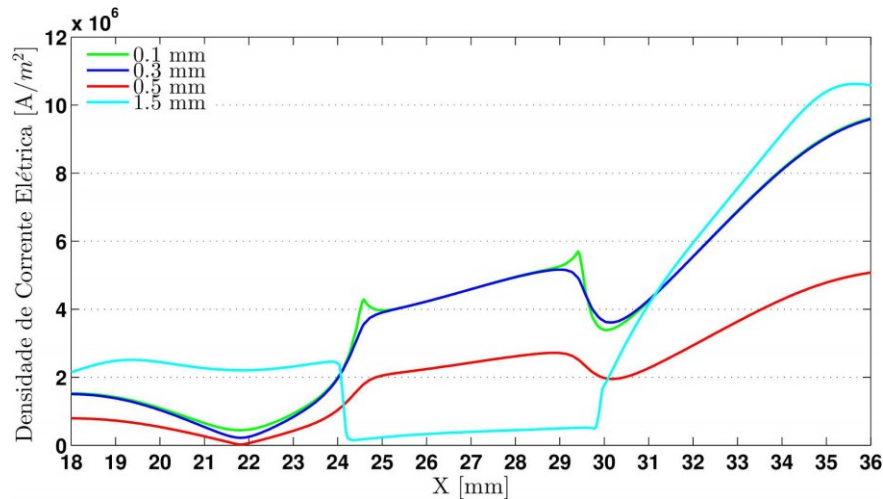


Figura 4.55 – Densidade de corrente elétrica na horizontal para o modelo AT3-B2.

Foi observado nos modelos da abordagem tecnológica #3, que a densidade de corrente é mais densa na zona do *shoulder* mais próxima da zona de saída de corrente elétrica.

Para a AT3 observou-se que a maior densidade de corrente elétrica na zona da raiz do MB ocorre no modelo da base de mármore (B2). Nesta zona, o modelo da base condutora (B1) apresenta um intervalo de valores de  $3 \text{ a } 5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$  e o modelo da base de mármore apresenta uma densidade de corrente de  $4.5 \text{ a } 5.5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ . Verificou-se que o uso da B2 provoca um aumento de densidade de corrente na zona da raiz do MB de 9 a 33 %.

#### 4.4 Simulação Híbrida

Aqui apresentam-se os perfis de aumento de temperatura para as zonas mais críticas da ferramenta e material base. Estes perfis são obtidos processando os dados de densidade de corrente elétrica com o modelo analítico desenvolvido.

Os resultados da simulação da densidade de corrente podem ser analisados no MatLab, aplicando as Equações 4.18 e 4.19 para obter os valores de intensidade de corrente e temperatura. A área de secção usada corresponde à secção do volume de controlo considerado durante o estabelecimento do modelo teórico e varia consoante a metodologia simulada. Os resultados tratados para a primeira abordagem tecnológica podem ser observados nos gráficos da Figura 4.56.

$$I = I_{\text{densidade}} \times A_{\text{secção}} \quad (4.18)$$

$$A_{\text{secção}} = \frac{\pi \cdot \phi_{\text{controlo}}^2}{4} \quad (4.19)$$

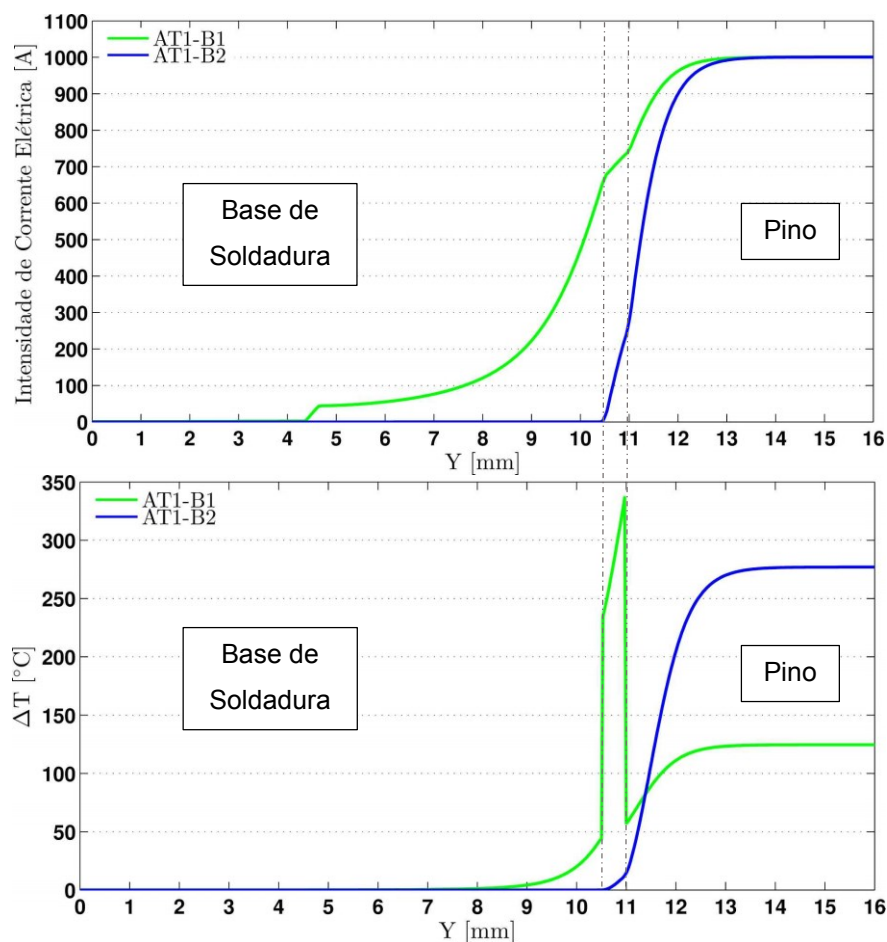


Figura 4.56 – Gráficos de Intensidade de corrente e variação de temperatura para a AT1. O tracejado delimita a zona de MB entre o pino e a base de soldadura

Da análise destes gráficos, conclui-se que o modelo analítico sugere um aumento de temperatura de pelo menos 250 °C na zona da raiz do material base, utilizando a base condutora, enquanto a utilização da base de mármore provoca um aumento de temperatura inferior a 10 °C. Este baixo aumento deve-se à baixa densidade de corrente no centro do modelo.

## 4.5 Síntese do Capítulo

O modelo analítico retificado mostrou que o aumento de temperatura gerado pelo aumento da intensidade de corrente elétrica é maior do que o previsto inicialmente pelo modelo original

Os resultados das simulações numéricas permitiram fazer observações quando à densidade de corrente elétrica para as diferentes abordagens tecnológicas. No modelo da AT1-B1 observou-se a maior densidade de corrente elétrica na zona da raiz do MB abaixo do pino, para esta AT. Para as abordagens tecnológicas #2 e #3, observou-se a repetição de um padrão na troca de bases de soldadura: ocorre maior densidade de corrente na raiz do MB nos modelos

com a base de mármore (AT2-B2 e AT3-B2) do que nos modelos com base em aço (AT2-B1 e AT3-B1). A utilização da base de mármore em vez da base de aço pode causar um aumento da temperatura no MB entre 15 e 40% para a AT2 e entre 9 a 33 % para a AT3.

Nos modelos da AT2, a maior densidade de corrente situa-se na zona do pino da fronteira entre material base e *shoulder*, ao passo que nos modelos da AT3, a densidade de corrente é mais densa na zona do *shoulder* mais próxima da zona de saída de corrente elétrica.



---

## 5 Procedimento Experimental

### 5.1 Introdução

Neste capítulo são relatados os procedimentos experimentais seguidos para a validação das novas abordagens tecnológicas do processo de soldadura por fricção linear assistida por corrente elétrica.

O material base utilizado nos ensaios é caracterizado no § 5.2. No § 5.3, os ensaios experimentais são descritos para cada abordagem tecnológica testada. Em § 5.4, § 5.5 e § 5.6 relatam-se os procedimentos de análise metalográfica, ensaios de dureza e condutividade elétrica aplicados aos cordões de soldadura.

### 5.2 Caracterização do Material Base

Os materiais base escolhidos para este estudo foram as ligas de alumínio AA 1100 e AA 6082-T6, em chapa. Todas as chapas tinham 200 mm de comprimento, exceto uma que tinha mais 10 mm, para facilitar a ligação direta da fonte de corrente às chapas. A Tabela 5.1 sumariza as dimensões das chapas utilizadas e as Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam a composição química das ligas utilizadas.

Tabela 5.1 – Dimensões de chapas usadas.

Material	Largura (mm)	Espessura (mm)
AA 1100	50	3
AA 1100	50	3.5
AA 1100	100	10
AA 6082-T6	100	3
AA 6082-T6	100	3.3
AA 6082-T6	100	3.5

Tabela 5.2 – Composição química da liga AA 1100 em percentagem [33]

Al	Cu	Mg	Mn	Si+Fe	Ti	Zn
min. 99.0	0.05-0.20	máx. 0.10	máx. 0.05	máx. 1.0	máx. 0.10	máx. 0.10

Tabela 5.3 – Composição química da liga AA 6082-T6 em percentagem [33]

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
95.2-98.3	máx. 0.25	máx. 0.10	máx. 0.50	0.60-1.2	0.40-1.0	0.70-1.3	máx. 0.10	máx. 0.20

### 5.3 Parâmetros dos Ensaios Experimentais

As chapas descritas no subcapítulo anterior foram soldadas por fricção linear assistida por corrente elétrica. As abordagens tecnológicas de SFLAE desenvolvidas foram testadas em várias configurações de material base, com diferentes valores de velocidade de avanço, de rotação e comprimento saliente do pino.

Todos os cordões de soldadura foram divididos em três zonas distintas: na primeira aguardou-se a estabilização do processo; na segunda deu-se início à passagem de corrente elétrica pela ferramenta e material base; e na última abriu-se o circuito elétrico e o processo terminou a soldadura com intensidade de corrente nula. Cada zona corresponde a aproximadamente 70 mm de cordão soldado. Esta medida não é constante para todos os ensaios devido a constrangimentos de espaço causados por alguns apertos usados nas montagens experimentais.

Foram realizadas soldaduras topo-a-topo para todos os ensaios, exceto para os dois primeiros onde se usou a configuração *bead on plate*. A Tabela 5.4 faz um resumo dos ensaios realizados e a Tabela 5.5 agrupa-os por abordagem tecnológica.

Tabela 5.4 – Ensaios experimentais realizados em SLFAE

SFL	Configuração			Material Base		Parâmetros do Processo		
	AT	Base	Pino (mm)	Liga	Espessura (mm)	$\Omega$ (rev/min)	$v_x$ (mm/min)	I (A)
#1	AT1	B1	2.4	AA 1100	10	1120	90	40
#2	AT1	B1	2.4	AA 1100	10	1120	90	200
#3	AT1	B1	2.4	AA 6082	3.3	1120	90	280
#4	AT1	B1	3	AA 1100	3.5	1120	90	--
#5	AT2	B1	2.7	AA 1100	3.5	1120	90	280
#6	AT2	B1	2.7	AA 6082	3.5	1120	90	280
#7	AT2	B1	1.6	AA 6082	3	1120	90	280
#8	AT3	B1	3.4	AA 6082	3.5	710	140	300
#9	AT1	B1	2.6	AA 1100	3.5	1120	90	300
#10	AT1	B1	2.6	AA 1100	3.5	710	112	300
#11	AT1	B2	2.6	AA 1100	3.5	710	112	290
#12	AT3	B2	2.6	AA 6082	3	710	140	290

Tabela 5.5 – Esquema dos ensaios de SFLAE.

		Ferramenta		
		Abordagem Tecnológica #1	Abordagem Tecnológica #2	Abordagem Tecnológica #3
Base	Base de Aço	#1, #2, #3, #4, #9, #10	#5, #6, #7	#8
	Base de Mármore	#11	--	#12

### 5.3.1 Abordagem Tecnológica #1: Pino e *Shoulder* em Alumina

Com a primeira abordagem tecnológica foram realizados sete ensaios experimentais. Utilizaram-se três ferramentas de alumina com comprimentos de pino diferentes.

Com o objetivo de observar o comportamento da ferramenta em funcionamento, nos dois primeiros ensaios com esta abordagem foram processadas chapas de liga de alumínio AA 1100, de 200x100x10 mm, numa junta *bead on plate*. A fonte de alimentação usada no ensaio #1 foi uma bateria e obteve-se uma intensidade de corrente de apenas 40 A. Pelas razões mencionadas em § 3.3.3, utilizou-se a partir do ensaio #2 um transformador de corrente alternada, capaz de fornecer até 300 A. O comprimento do pino foi 2.4 mm, tendo sido utilizada a base de soldadura em aço.

Após uma observação dos cordões e ferramenta, deu-se início aos ensaios de juntas topo-a-topo. No ensaio #3 soldaram-se duas chapas de liga AA 6082-T6, de 200x100x3.3 mm e mantiveram-se as restantes condições usadas nos ensaios anteriores. Decidiu-se usar no ensaio #4 outra ferramenta de alumina, com um pino de 3 mm. Esta partiu-se ao entrar em contacto com as chapas de liga AA 1100. Todos os ensaios desta abordagem tecnológica são sumarizados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Ensaios experimentais com a abordagem tecnológica #1

SFL	Pino (mm)	Base	Material Base		Parâmetros de Soldadura		
			Liga	Dimensões (mm)	$\Omega$ (rev/min)	$v_x$ (mm/min)	I (A)
#1	2.4	B1	AA 1100	200x100x10	1120	90	40
#2	2.4	B1	AA 1100	200x100x10	1120	90	200
#3	2.4	B1	AA 6082-T6	200x100x3.3	1120	90	280
#4	3	B1	AA 1100	200x50x3.5	1120	90	--
#9	2.6	B1	AA 1100	200x50x3.5	1120	90	300
#10	2.6	B1	AA 1100	200x50x3.5	710	112	300
#11	2.6	B2	AA 1100	210x50x3.5	710	112	290

### 5.3.2 Abordagem Tecnológica #2: Pino em Aço e *Shoulder* em Alumina

A segunda abordagem tecnológica foi aplicada em três ensaios experimentais, todos em juntas topo-a-topo, na base de soldadura em aço e com os mesmos parâmetros de soldadura. A ferramenta utilizada possuía um *shoulder* de alumina e um pino de aço de comprimento ajustável.

Após os ensaios #5 e #6 o *shoulder* desta abordagem tecnológica partiu-se, impossibilitando a continuação do trabalho experimental com esta abordagem tecnológica. O resumo destes ensaios é apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Ensaios experimentais com a abordagem tecnológica #2

SFL	Pino (mm)	Base	Material Base		Parâmetros de Soldadura		
			Liga	Dimensões (mm)	$\Omega$ (rev/min)	$v_x$ (mm/min)	I (A)
#5	2.7	B1	AA 1100	200x50x3.5	1120	90	280
#6	2.7	B1	AA 6082-T6	200x100x3.5	1120	90	280
#7	1.6	B1	AA 6082-T6	200x100x3	1120	90	280

### 5.3.3 Abordagem Tecnológica #3: Pino em Aço e *Shoulder* em Titânio

Esta abordagem tecnológica foi usada em dois ensaios experimentais, um para cada base de soldadura proposta, em chapas de alumínio de liga AA 6082-T6 com os mesmos parâmetros de soldadura, exceto comprimento de pino e espessura de chapas a soldar.

A Tabela 5.8 resume os ensaios #8 e #12, realizados com a terceira abordagem tecnológica.

Tabela 5.8 – Ensaios experimentais da abordagem tecnológica #3

SFL	Pino (mm)	Base	Material Base		Parâmetros de Soldadura		
			Liga	Dimensões (mm)	$\Omega$ (rev/min)	$v_x$ (mm/min)	I (A)
#8	3.4	B1	AA 6082-T6	200x100x3.5	710	140	300
#12	2.6	B2	AA 6082-T6	200x100x3	710	140	290

## 5.4 Análise Metalográfica

A análise metalográfica dos cordões soldados foi realizada com o propósito de observar o efeito da passagem de corrente elétrica pelo material soldado.

Para esta análise, foram cortados troços dos cordões obtidos nos ensaios considerados determinantes, correspondentes às três zonas críticas do cordão: zona de estabilidade de processo, zona de aplicação de aplicação de corrente elétrica e a zona de fim do processo. Assim, de cada cordão foram retiradas 4, 5 ou 6 amostras. A Tabela 5.9 mostra a quantidade de macrografias retiradas de cada ensaio. Os ensaios #1 e #2 foram excluídos desta e das outras análises pois apenas serviram o propósito de observar o desempenho das ferramentas em funcionamento. O ensaio #4 foi excluído por não ter produzido um cordão. Os ensaios #7 e #9 foram excluídos por serem considerados os menos relevantes ou redundantes.



Tabela 5.9 – Amostras por ensaio experimental analisado

SFL	AT	Base	Liga	Amostras		
				Zona 1	Zona 2	Zona 3
#3	AT1	B1	AA 6082-T6	2	2	2
#5	AT2	B1	AA 1100	1	2	2
#6	AT2	B1	AA 6082-T6	1	2	2
#8	AT3	B1	AA 6082-T6	1	2	1
#10	AT1	B1	AA 1100	2	2	2
#11	AT1	B2	AA 1100	1	2	1
#12	AT3	B2	AA 6082-T6	1	2	1

As amostras foram embutidas em resina para facilitar o seu manuseamento. O critério usado para a observação das amostras dita que o lado em avanço corresponde ao lado esquerdo da secção que se pretende observar. Com esse critério, as amostras foram lixadas e polidas com uma polidora Buehler Phoenix Alpha. Após o contraste com o reagente de Keller (composição química na Tabela 5.10), foi possível observar as zonas de interesse em cada secção, como a raiz do cordão e zona termomecanicamente afetada, através de um microscópio ótico Olympus CX40RF200 com fonte de iluminação Olympus TH3.

Tabela 5.10 – Composição química, em percentagem, do reagente de Keller

Ácido nítrico HNO <sub>3</sub>	Ácido clorídrico HCl	Ácido fluorídrico HF	Água destilada H <sub>2</sub> O
2.5%	1.5%	1.0%	95%

## 5.5 Ensaios de Dureza

Os ensaios de dureza foram aplicados às amostras dos cordões soldados. Utilizou-se um durometro Mitotoyo HM-112.

As micro-indentações foram realizadas com uma carga de 200 g. O espaçamento entre indentações é variável. Para os primeiros 5 mm de cada lado do centro do cordão fizeram-se indentações com espaçamento de 0.5 mm entre elas e para lá desse intervalo um espaçamento de 1 mm. Cada amostra tem dois perfis de dureza, traçados na horizontal a partir de duas alturas distintas: um perfil a passar pelo *nugget* e outro a passar entre o *nugget* e a raiz do cordão soldado. Excepcionalmente, o ensaio #3 tem três perfis nas 4 primeiras amostras: dois no *nugget* e um entre *nugget* e raiz.

## 5.6 Ensaios de Medição de condutividade Elétrica

Para caracterizar as amostras dos cordões ensaiados, foi aplicado o método de END por correntes induzidas. Para adquirir os perfis de condutividade elétrica, foi utilizada uma sonda *Pencil Probe* Nortec P/100 KHz – 500 KHz / A/ 90.5/6, S/N R07471, acoplada a um dispositivo

automático para a inspeção de provetes e ligada a um equipamento comercial de inspeção por CI, Olympus Nortec 500.

Tabela 5.11 – Parâmetros de teste utilizados nos ensaios de CI.

Parâmetros	
Frequência (kHz)	100, 250
Ganho (dB)	50
<i>Lift-off</i> (μm)	0
Varrimento (mm)	40
Direção	Do lado em retrocesso para o lado em avanço
Resolução (μm)	100

As amostras utilizadas neste ensaio não correspondem às amostras inspecionadas ao microscópio e ensaios de dureza, pois foram embutidas em resina. Em vez dessas, foram retiradas amostras em zonas adjacentes, cuja face do defeito foi lixada suavemente, para reduzir o risco de leituras incorretas devido ao efeito de *lift-off* causado por irregularidades na superfície no material.

## 5.7 Síntese do Capítulo

O procedimento experimental seguido no decorrer deste trabalho foi aqui apresentado. Analisou-se o material base usado e relataram-se os ensaios efetuados com o processo de SFLAE, assim como os percalços enfrentados para todas as abordagens tecnológicas desenvolvidas.

Os procedimentos dos três métodos de análise aplicados às soldaduras produzidas foram descritos, referindo as condições laboratoriais, equipamento e consumíveis utilizados.

## 6 Resultados e Discussão

### 6.1 Introdução

Este capítulo dedica-se à análise de uma seleção dos cordões soldados com os resultados mais relevantes. Para tal, recorreu-se à inspeção visual das soldaduras, apresentadas juntamente com os gráficos de corrente elétrica no § 6.2, à análise metalográfica de macrografias dos cordões no § 6.3, a ensaios de dureza no § 6.4, e por fim, a ensaios de condutividade elétrica em troços das soldaduras no § 6.5.

### 6.2 Inspeção Visual

A Figura 6.1 apresenta a vista geral do cordão obtido com o ensaio #3, efetuado com a ferramenta de alumina, na base de aço (AT1-B1). Pode verificar-se que a corrente aplicada não provocou alterações visíveis na superfície do cordão.

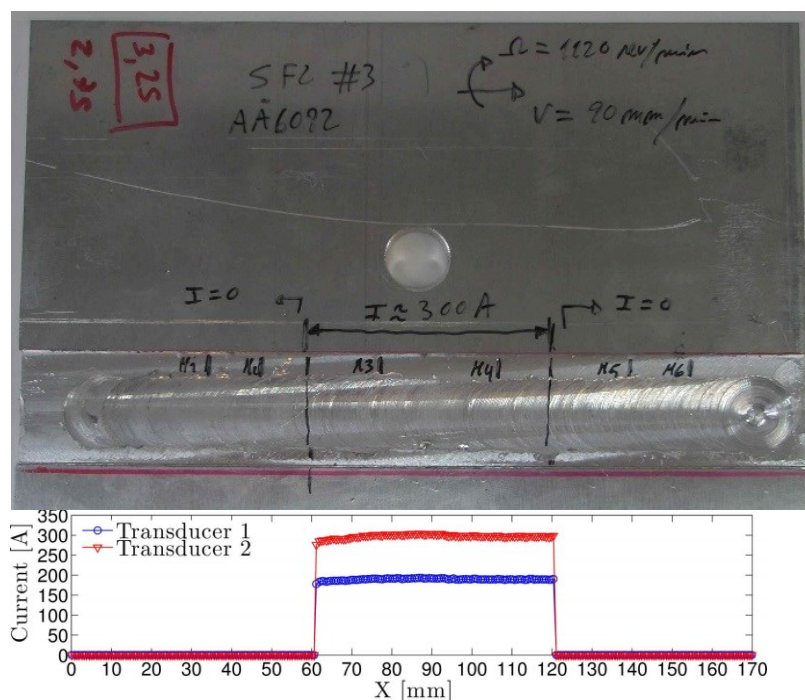


Figura 6.1 – Soldadura do ensaio #3 e gráfico de corrente elétrica.

Com a AT2, foi possível soldar dois cordões segundo os mesmos parâmetros, exceto material base, e um terceiro, não considerado nesta análise devido a redundância. No ensaio #5 soldaram-se chapas de liga de alumínio 1100 (Figura 6.2) e no #6 usaram-se chapas de liga de alumínio 6082-T6 (Figura 6.3). Esta abordagem gerou bastante rebarba na superfície do ensaio #5, possivelmente devido à dureza inferior da liga soldada.

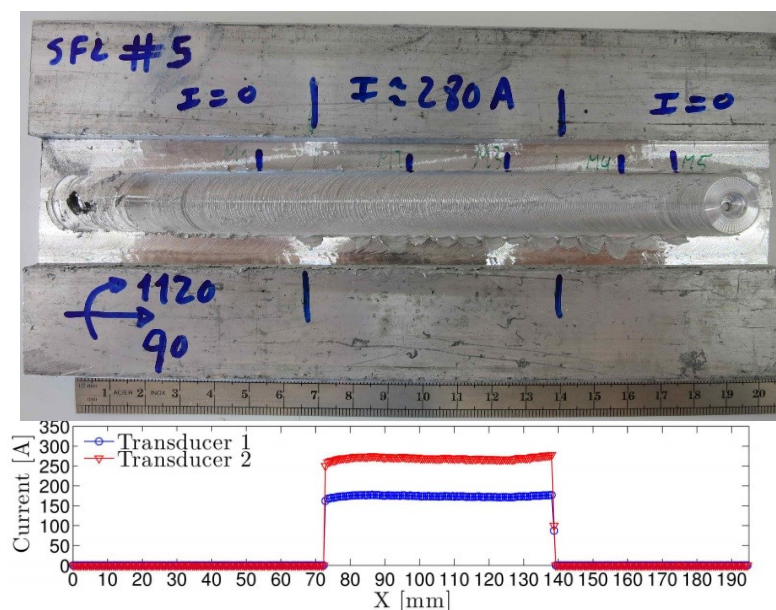


Figura 6.2 – Soldadura do ensaio #5 e gráfico de corrente elétrica.

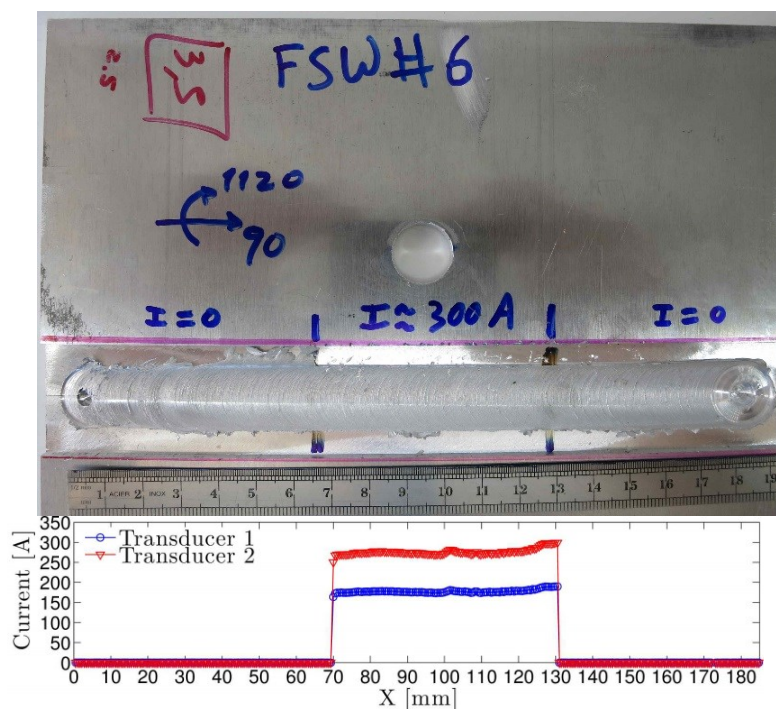


Figura 6.3 – Soldadura do ensaio #6 e gráfico de corrente elétrica.

O primeiro teste da ferramenta da abordagem tecnológica #3 foi realizado no ensaio #8 (Figura 6.4). Neste ensaio as dimensões reduzidas da ferramenta, em comparação ao tamanho das outras abordagens, permitiu o uso de um conjunto de batentes com zonas próprias para colocar os termopares do equipamento de aquisição de dados, mediram valores máximos de temperatura de cerca de 150 °C, na zona do material base. O relevo do *shoulder* manifestou-se no acabamento superficial do cordão que exibe uma zona bastante irregular à superfície.

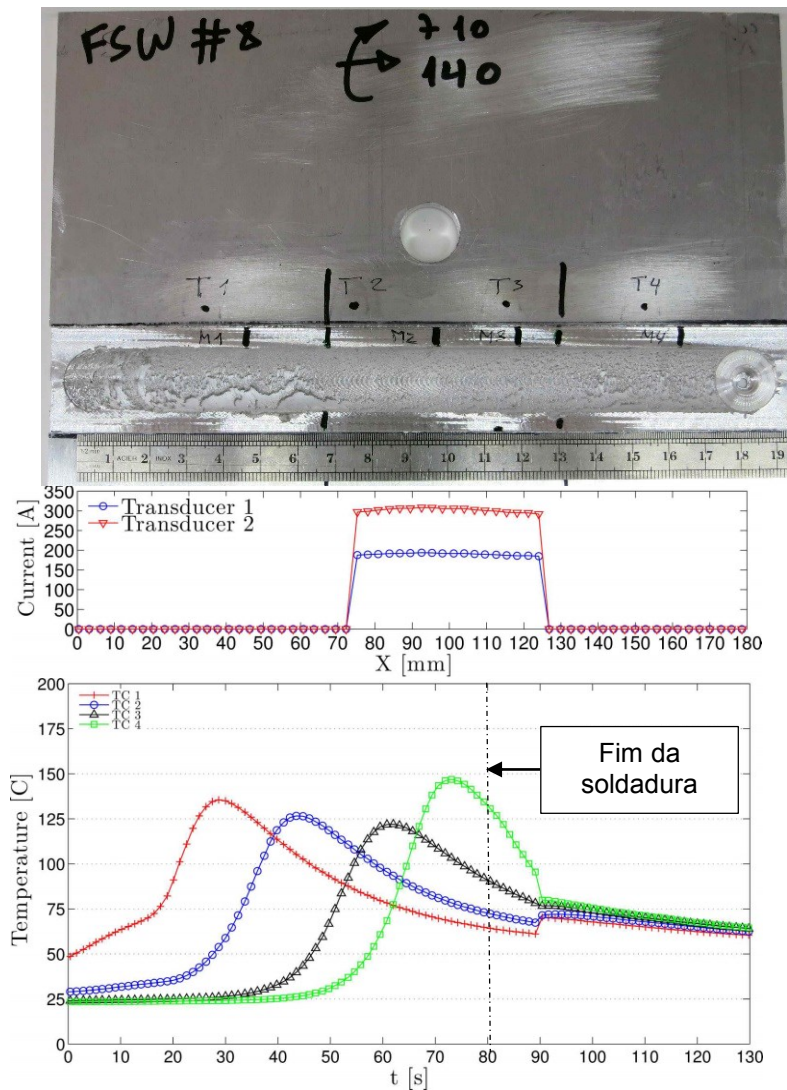


Figura 6.4 – Soldadura do ensaio #8, gráfico de corrente elétrica e de aumento de temperatura nos termopares.

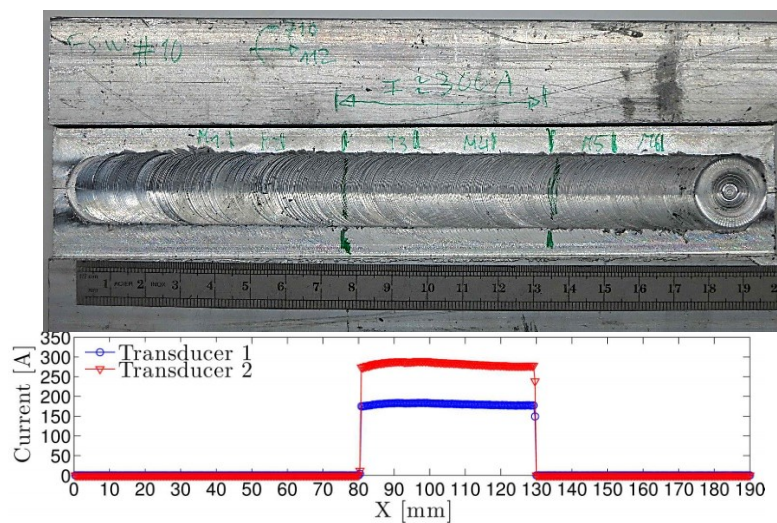


Figura 6.5 – Soldadura do ensaio #10 e gráfico de corrente elétrica.



O ensaio #10, em AA 1100 (Figura 6.5), mostrou menos rebarba do que o ensaio #5, onde se soldou a mesma liga. Verificou-se que o ensaio #11 (Figura 6.6) com a AT1 produziu menos rebarba e uma superfície de cordão com um aspeto polido, mais lisa do que qualquer outro ensaio.

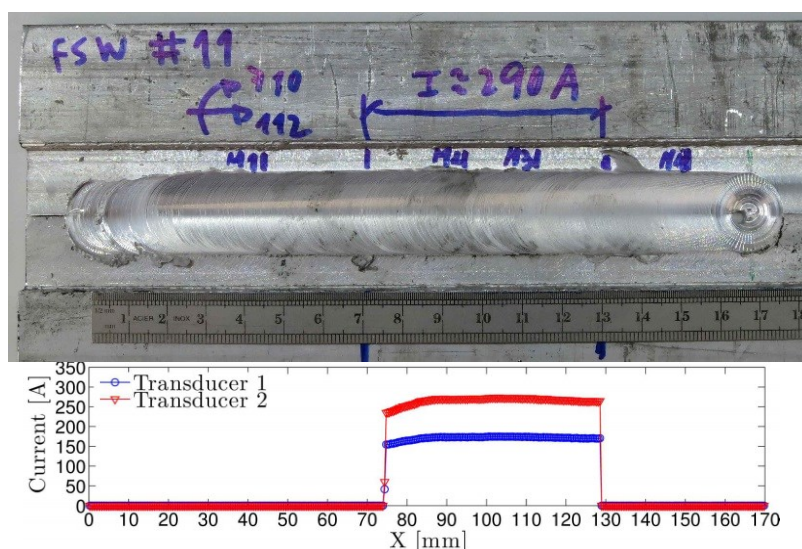


Figura 6.6 – Soldadura do ensaio #3 e gráfico de corrente elétrica.

Por fim, o ensaio #12 (Figura 6.7) obteve-se, tal como no ensaio #8, uma superfície de aspeto irregular. Foi possível voltar a instalar os termopares no material base, que mediram valores máximos de temperatura de cerca de 175 °C. Estes valores são maiores do que os medidos no ensaio #8 devido à utilização da base de mármore, que contribui para isolar o calor no material base em vez de o dissipar, como no caso do ensaio #8 com a base de aço.

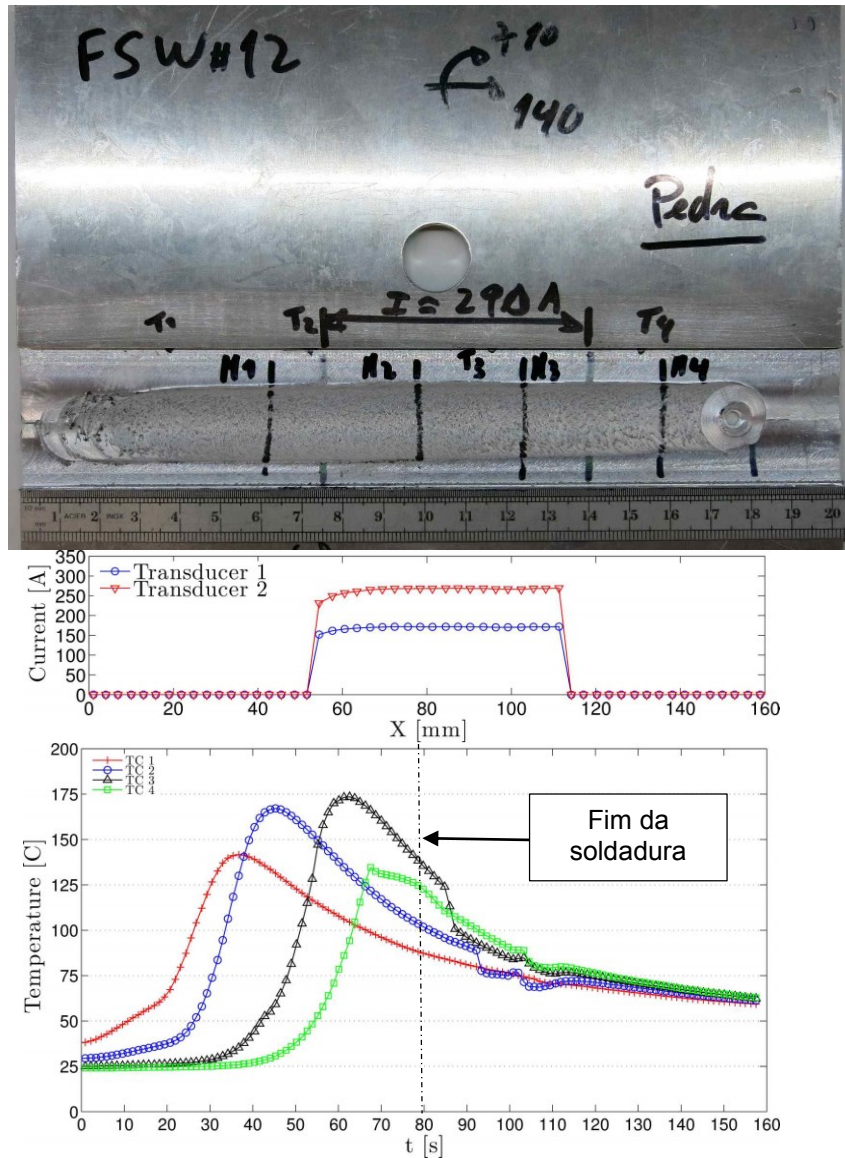


Figura 6.7 – Soldadura do ensaio #12, gráfico de corrente elétrica e aumento de temperatura nos termopares.

### 6.3 Análise Metalográfica

As soldaduras efetuadas com a ferramenta de alumina com alma de cobre (AT1) apresentaram os defeitos mais salientes de todos os ensaios. Apesar da fraca qualidade destes cordões de soldadura, observou-se a diminuição das dimensões de alguns defeitos nas zonas de aplicação de corrente elétrica (ZACE) dos ensaios #3 e #10. No ensaio #3, há uma clara diminuição da espessura do defeito da raiz nas macrografias de amostras das zonas de aplicação de corrente elétrica (M3 e M4). Nas amostras seguintes, M5 e M6, de corrente elétrica nula, a espessura do defeito volta a aumentar. A Figura 6.8 mostra as macrografias das amostras M1 e

M3 e respectivos pormenores na zona da raiz e a Figura 6.9 apresenta os mesmos elementos das amostras M4 e M5. Neste ensaio, a intensidade de corrente usada foi de cerca de 300 A.

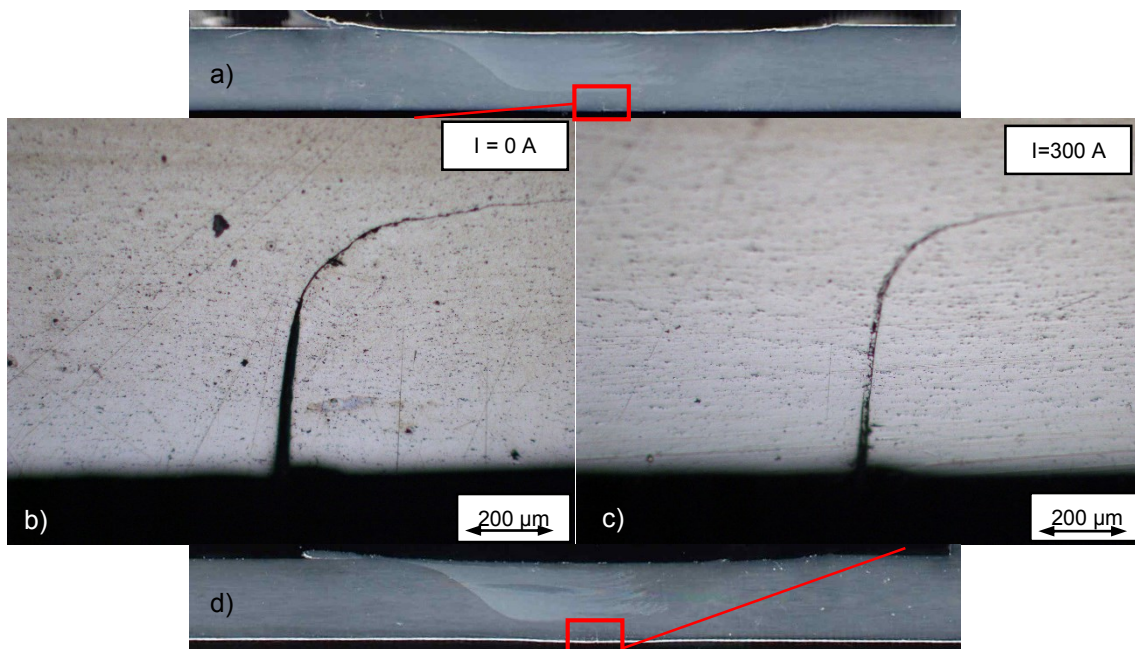


Figura 6.8 – Macrografia da secção transversal do ensaio #3 (AT1-B1), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M1, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M3, com destaque da falta de mistura do material base, d) Macrografia da amostra M3, em zona de aplicação de corrente elétrica.

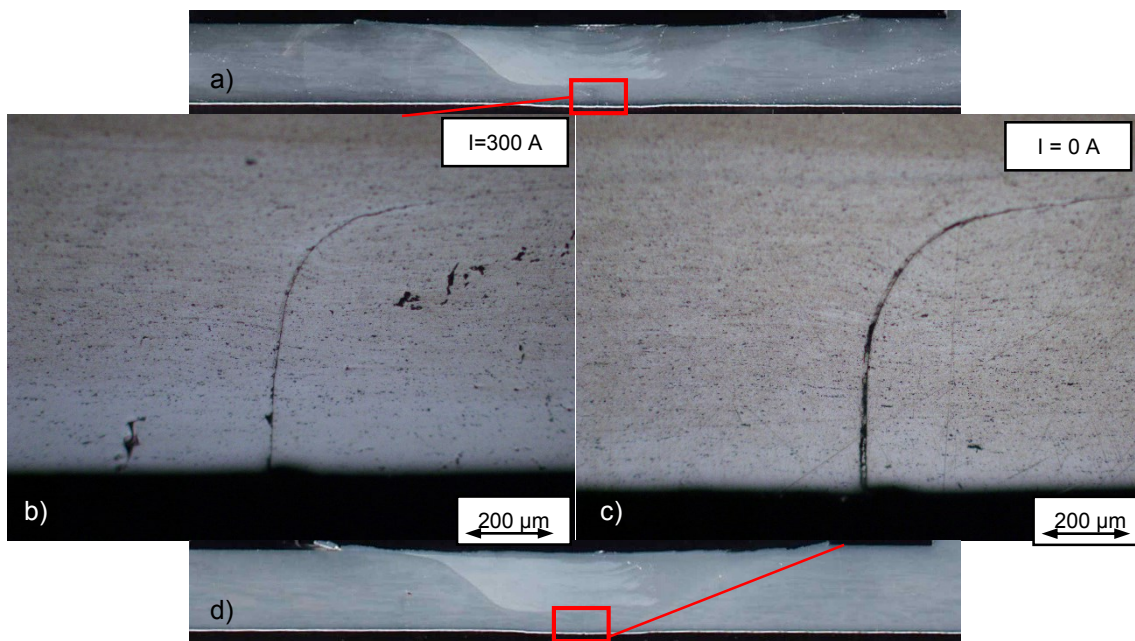


Figura 6.9 – Macrografia do ensaio #3 (AT1-B1), a) Amostra M4, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M4, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M5, com destaque da falta de mistura do material base, d) Amostra M5, em zona sem passagem de corrente.

No ensaio #10, verificou-se a diminuição da espessura do defeito de falta de mistura de material, desde a primeira amostra (M1) até às zonas de aplicação de corrente elétrica (M3 e



M4). A Figura 6.10 mostra a diferença na dimensão do defeito de falta de mistura no material para as amostras M2 e M3. No entanto, após as ZACE, de M5 a M6 foram observadas evidências do aparecimento de um canal na zona da raiz do cordão. A propagação deste defeito é apresentada na Figura 6.11. Foi usada neste ensaio uma intensidade de corrente elétrica de 300 A.

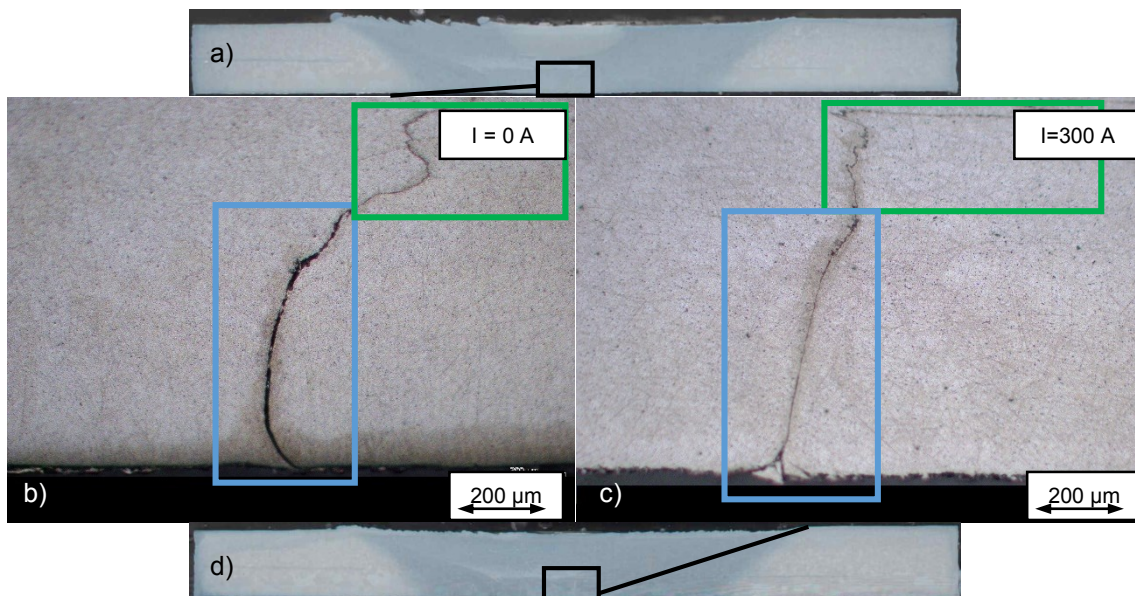


Figura 6.10 – Macrografia do ensaio #10 (AT1-B1), a) Amostra M2, com  $I=0$  A, b) Pormenor do defeito na raiz de M2, destaque da falta de mistura do MB (azul) e alinhamento de óxidos (verde), c) Pormenor do defeito na raiz de M3, destaque da falta de mistura do MB (azul) e alinhamento de óxidos (verde), d) Amostra M3, em ZACE.

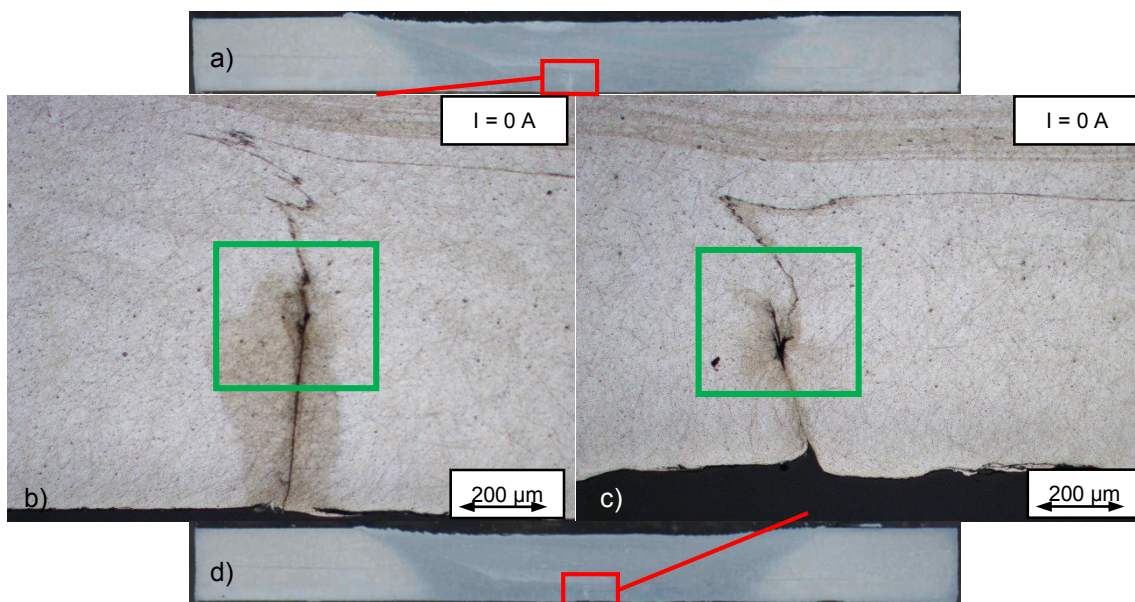


Figura 6.11 – Macrografia do ensaio #10 (AT1-B1), a) Amostra M5, com  $I=0$  A, b) Pormenor do defeito na raiz de M5, destaque do início da propagação do *wormhole*, c) Pormenor do defeito na raiz de M6, destaque da propagação do *wormhole*, d) Amostra M6, com  $I=0$  A.

O ensaio #11, em base de soldadura de mármore, apresenta defeitos de falta de mistura do material em todas as amostras. Este defeito diminui da amostra M1 para a M2 e volta a aumentar para M3. As amostras M2 e M3 correspondem neste ensaio às ZACE. A amostra M4 exhibe um defeito de falta de mistura de material com uma morfologia distinta dos anteriores: este

descreve uma reta vertical e uma curva, em vez de se assemelhar a uma reta diagonal, como nos casos anteriores. É possível que este defeito tenha origem na falta de penetração do pino devida a uma ligeira diferença de espessura nas chapas, ou ao aperto incorreto destas durante o ensaio. A Figura 6.12 ilustra a macrografia das amostras M1 e M2 e a Figura 6.13 apresenta a macrografia das amostras M3 e M4, todas com destaque no defeito na raiz do cordão. A intensidade de corrente neste ensaio foi de 290 A.

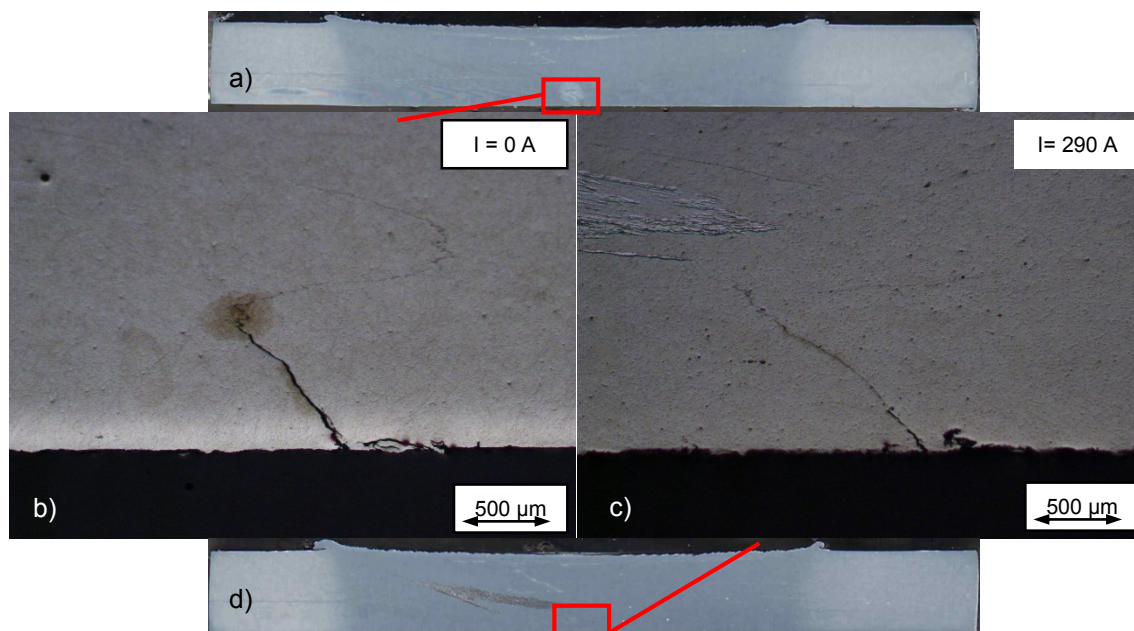


Figura 6.12 – Macrografia da secção transversal do ensaio #11 (AT1-B2), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M1, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M2, com destaque da falta de mistura do material base, d) Macrografia da amostra M2, em ZACE.

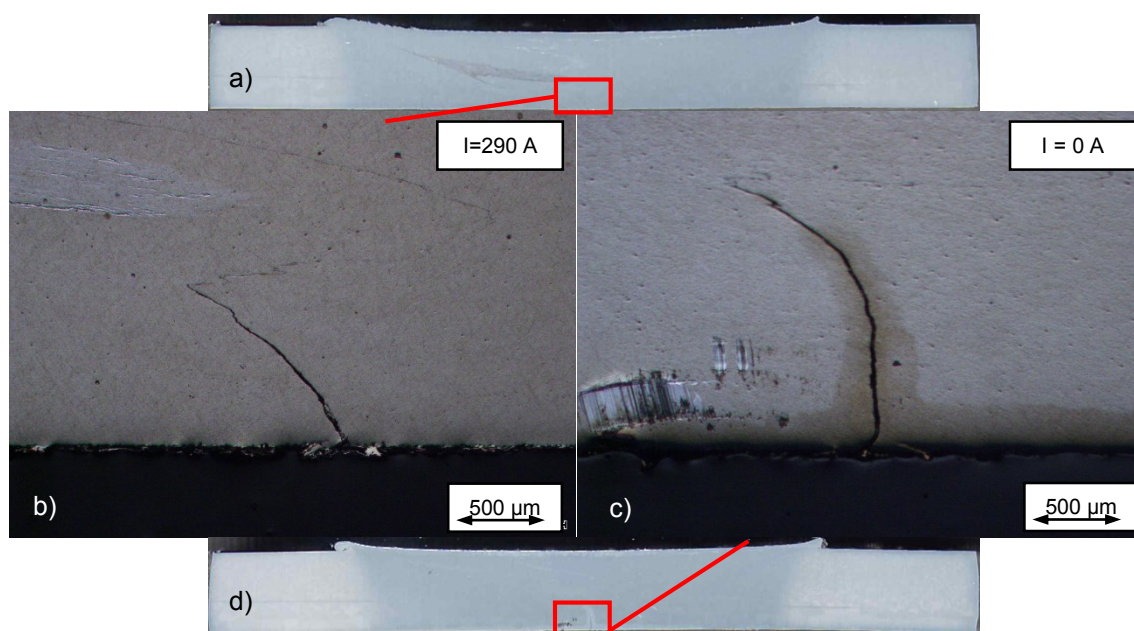


Figura 6.13 - Macrografia do ensaio #11 (AT1-B2), a) Amostra M3, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz de M3, com destaque da falta de mistura do material base, c) Pormenor da zona do defeito na raiz de M4, com destaque da falta de mistura do material base (azul) e alinhamento de óxidos (verde), d) Macrografia da amostra M4, com I=0 A.



Devido à geometria lisa e ao desgaste sofrido pelas ferramentas da AT1, ilustrado na Figura 6.14, pode considerar-se que existe um fluxo viscoplástico deficiente que contribui para o aparecimento de camadas de óxidos.

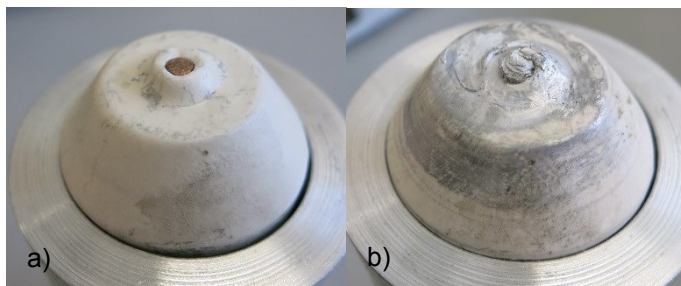


Figura 6.14 – Ferramenta de alumina da AT1, a) antes do ensaio #3, b) após a soldadura.

Nas macrografias correspondentes à abordagem tecnológica #2 foi observada a diminuição gradual de dois defeitos na raiz. As macrografias do ensaio #5 mostraram um cordão com um defeito de falta de penetração que apresenta uma espessura gradualmente menor, passando de cerca de 15  $\mu\text{m}$  para 5.5  $\mu\text{m}$  até ao fim da soldadura. Da Figura 6.15 à Figura 6.17, apresentam-se as macrografias das amostras M1, M2 e M5, com a zona da raiz e seus defeitos destacados. Apenas a amostra M2 corresponde a uma zona de aplicação de corrente elétrica de aproximadamente 280 A.

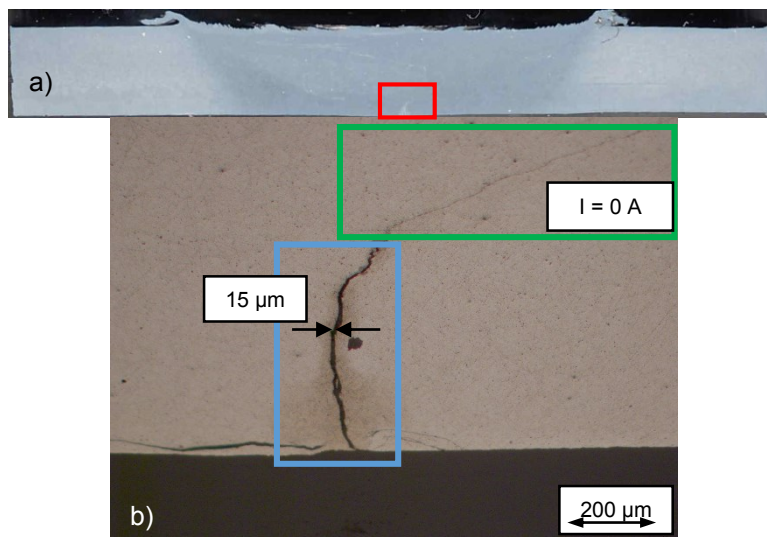


Figura 6.15 – Macrografia da secção transversal do ensaio #5 (AT2-B1), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul).

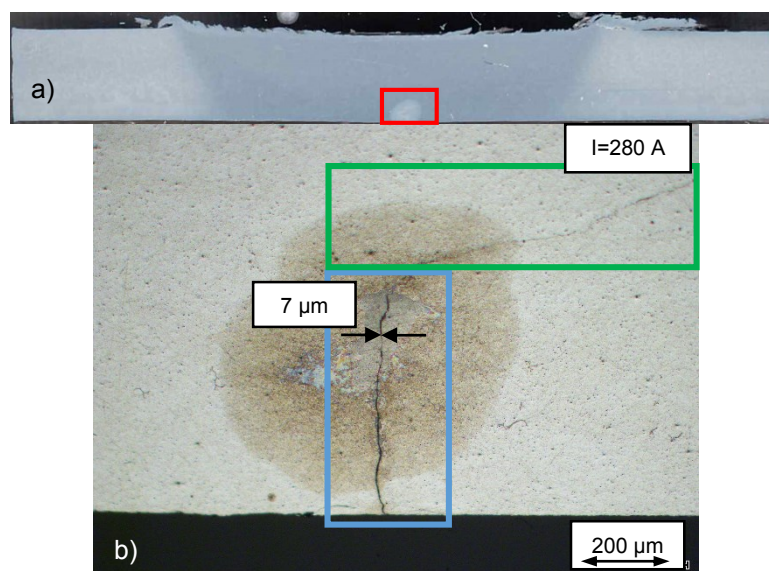


Figura 6.16 – Macrografia do ensaio #5, a) Amostra M2, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul).

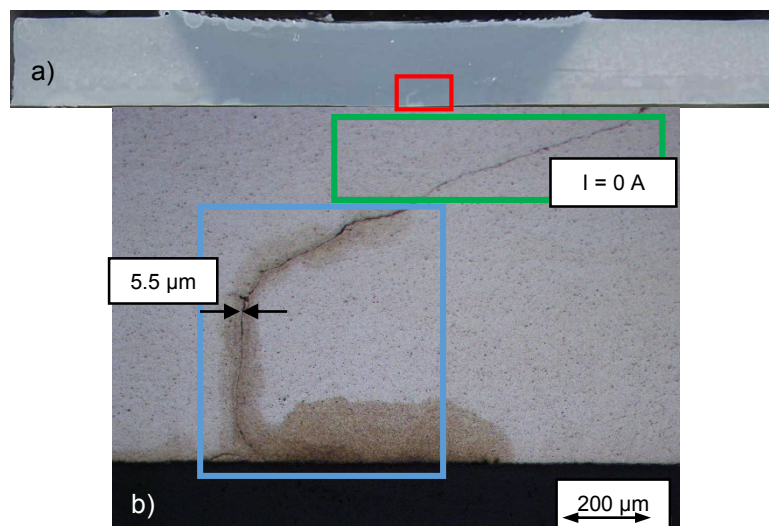


Figura 6.17 – Macrografia do ensaio #5, a) Amostra M5, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul).

No ensaio #6, identificou-se a presença de alinhamentos de camadas de óxidos em todas as amostras. Na amostra M1 observou-se um vazio e em M2, que corresponde a uma ZACE, a camada de óxidos é menor. Nas restantes amostras, foram observados alinhamentos com espessuras variadas: M3 (ZACE) mostra falta de mistura de material, M4 apresenta a camada de óxidos mais fina e em M5 observa-se uma maior. Assim, apesar de haver redução da dimensão deste defeito, o ensaio é inconclusivo. Da Figura 6.18 à Figura 6.20, são ilustradas as macrografias das amostras M1, M2 e M3, com destaques na raiz do cordão. As amostras M2 e M3 pertencem a uma zona de aplicação de corrente elétrica de cerca de 300 A.

Em relação aos ensaios da AT1, os ensaios da AT2, com *shoulder* em alumina e pino em aço, apresentam defeitos de menor dimensão e tal como dito anteriormente, a geometria do pino usado tem influência neste aspeto. Neste caso o pino de aço com canais promove melhor a disrupção de óxidos e mistura do material.

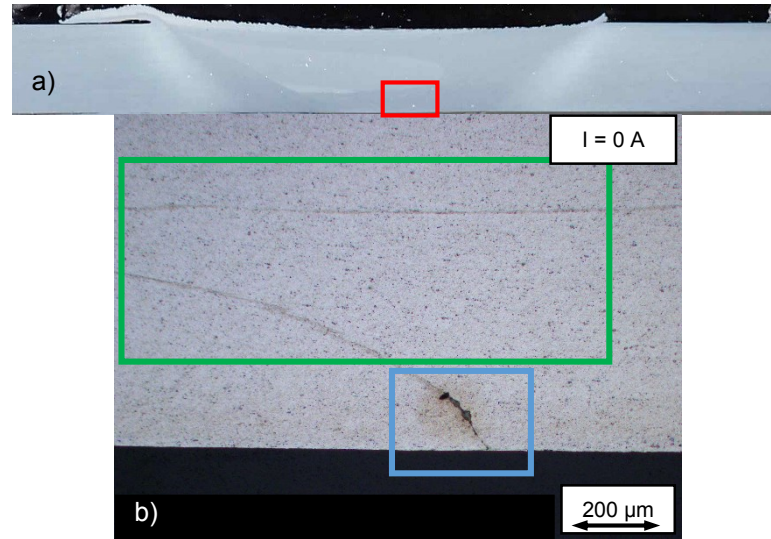


Figura 6.18 – Macrografia da secção transversal do ensaio #6 (AT2-B1), a) Macrografia da amostra M1, com intensidade de corrente nula, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul).

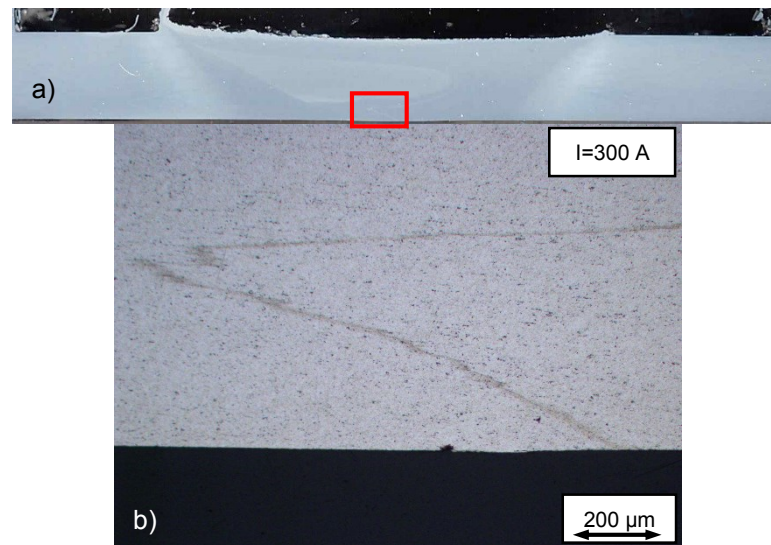


Figura 6.19 – Macrografia do ensaio #6 (AT2-B1), a) Amostra M2, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos.



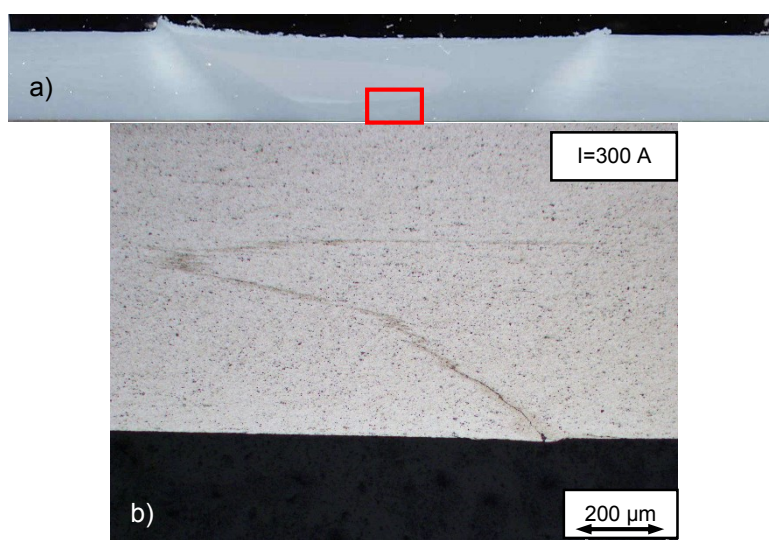


Figura 6.20 – Macrografia do ensaio #6 (AT2-B1), a) Amostra M3, em ZACE, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos.

A análise metalográfica realizada nos cordões com *shoulder* em titânio e pino de aço não permitiram tirar conclusões a respeito dos defeitos na zona da raiz. Neste caso, nos ensaios com a AT3 os cordões analisados não apresentaram defeitos na raiz do cordão, salvo numa situação que evidencia alinhamento de óxidos e falta de mistura do material. A Figura 6.21 apresenta este defeito que ocorre na macrografia da amostra M4, correspondente a uma zona posterior à zona de aplicação de corrente elétrica no final do ensaio #12.

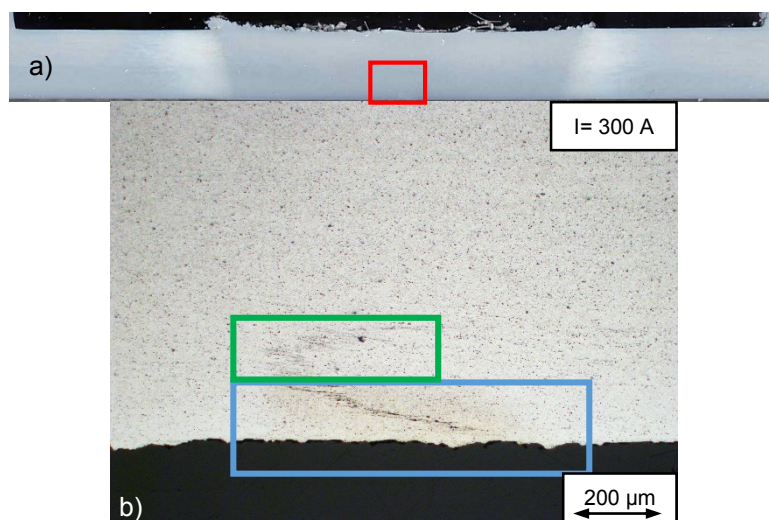


Figura 6.21 – Macrografia da secção transversal do ensaio #12 (AT1-B2), a) Macrografia da amostra M4, b) Pormenor da zona do defeito na raiz, com destaque do alinhamento de óxidos (verde) e da falta de mistura do material base (azul).

## 6.4 Ensaios de Dureza

Os perfis de dureza traçados não evidenciaram qualquer variação significativa entre os perfis de macrografias de zonas sem corrente e os perfis de zonas de aplicação de corrente elétrica. Esta observação é válida para todos os ensaios analisados.

Para a abordagem tecnológica #3, há distinção entre os perfis de dureza das amostras dos ensaios #8 e 12#: o último possui uma maior zona termomecanicamente afetada, tal como se pode verificar pela macrografia e perfil de dureza (Figura 6.23). É possível que a maior quantidade de material misturado tenha sido proporcionada pelo amaciamento de material, causado pelo aumento de temperatura no MB, devido à utilização da base de soldadura de mármore em vez da base de aço. Estes ensaios foram realizados em chapas da mesma liga e partilham os mesmos parâmetros de soldadura. A Figura 6.22 e Figura 6.23 apresentam os perfis de dureza das amostras M1 e M3 dos ensaios #8 e #12.

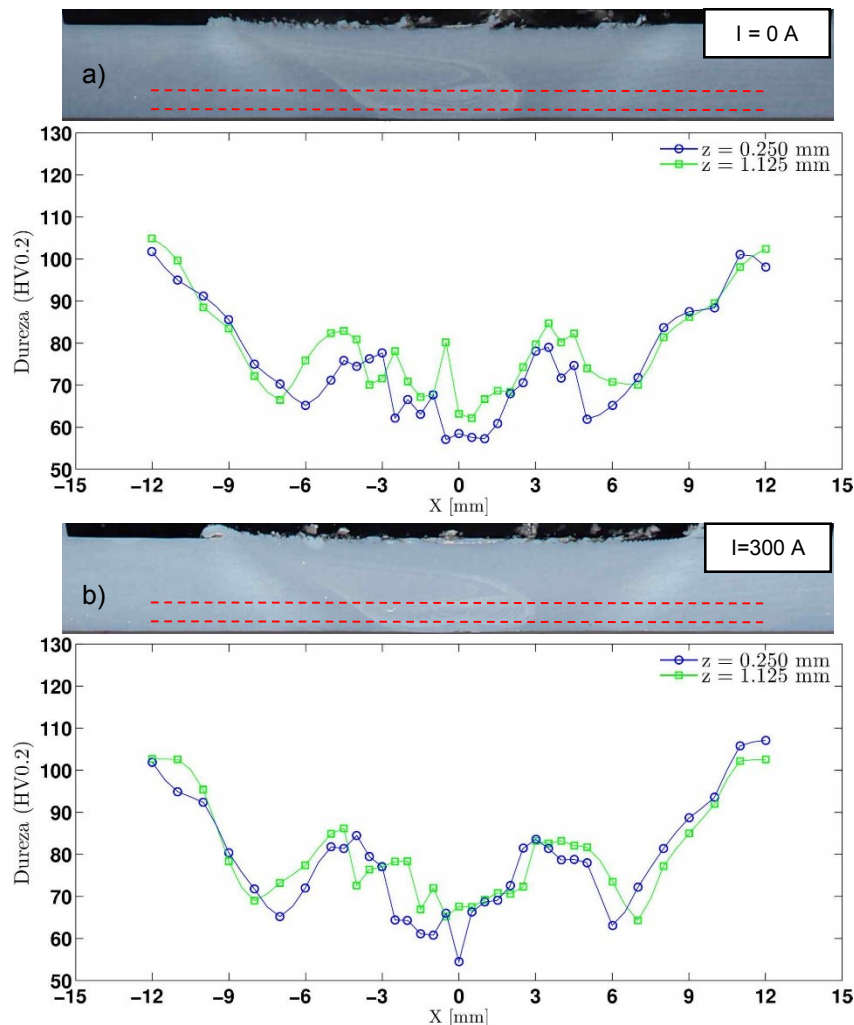


Figura 6.22 – Perfis de dureza do ensaio #8, a) Perfis de dureza da amostra M1, com  $I=0 \text{ A}$ , b) Perfis de dureza da amostra M3, com  $I=300 \text{ A}$ .

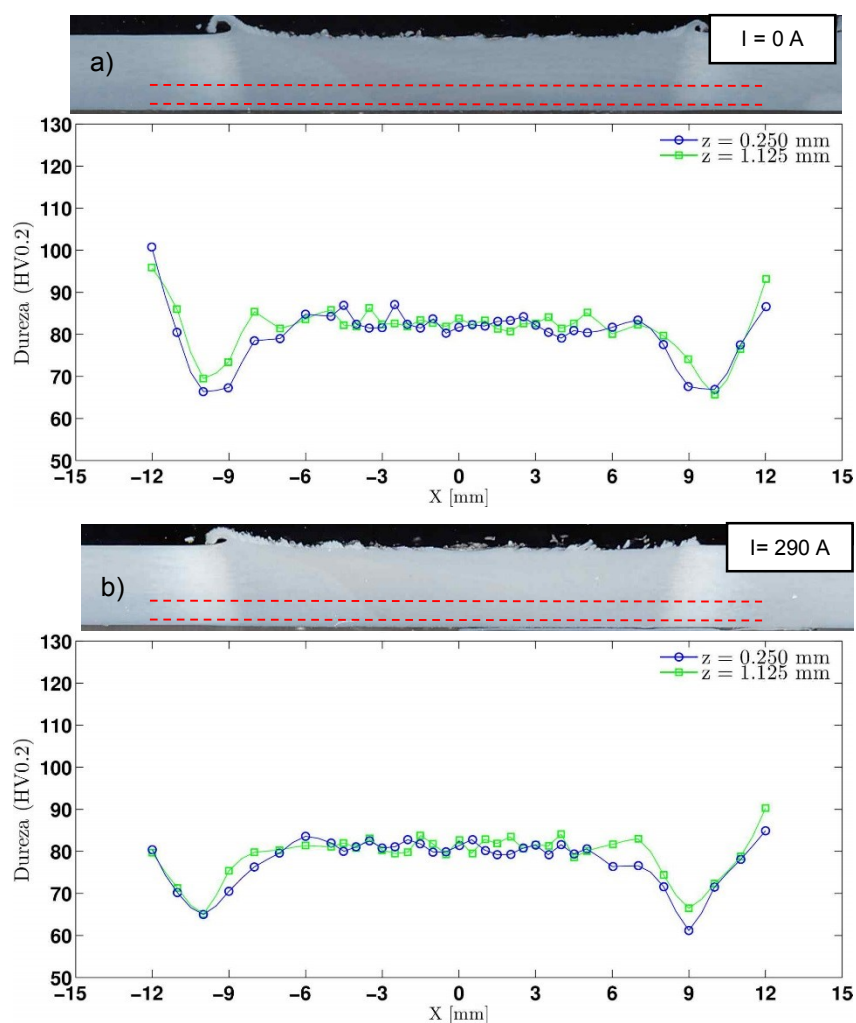


Figura 6.23 – Perfis de dureza do ensaio #12, a) Perfis de dureza da amostra M1, com  $I=0$  A, b) Perfis de dureza da amostra M3, com  $I=290$  A.

As Figuras 6.24 e 6.25 comparam os perfis de dureza medidos entre as amostras M1 e M3 do ensaio #8.

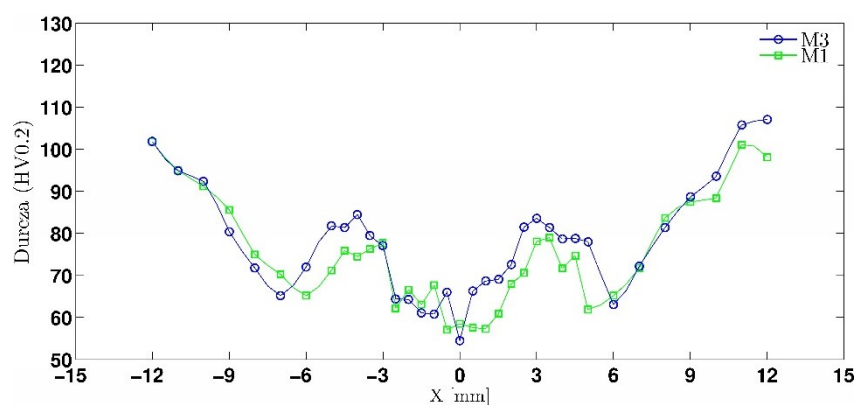


Figura 6.24 - Perfis de dureza do ensaio #8. Comparação entre durezas das amostras M1 e M3, a 1,125mm da raiz da junta.



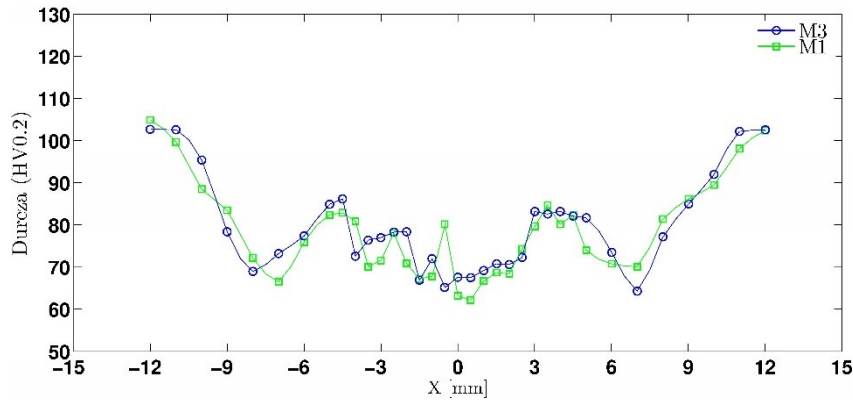


Figura 6.25 - Perfis de dureza do ensaio #8. Comparação entre durezas das amostras M1 e M3, a 0,250mm da raiz da junta.

## 6.5 Ensaios de Medição de Condutividade Elétrica

Para todos os cordões, os ensaios de medição de condutividade elétrica apenas identificam a presença dos defeitos na raiz e não permitem tirar conclusões quanto ao efeito da passagem de corrente. A Figura 6.26 mostra um perfil de condutividade elétrica para o ensaio #3.

A diferença entre perfis de dureza dos ensaios #8 e #12, verificada em § 6.4, é corroborada pelos resultados das medições de condutividade: na zona onde ocorreu maior mistura de material, o grão é mais refinado, o que provoca maior dureza e menor condutividade elétrica; e na zona afetada pelo calor pode ter havido coalescência do grão, o que explicaria o aumento de condutividade nesta zona. A Figura 6.27 e a Figura 6.28 apresentam perfis de condutividade para estes ensaios da AT3.

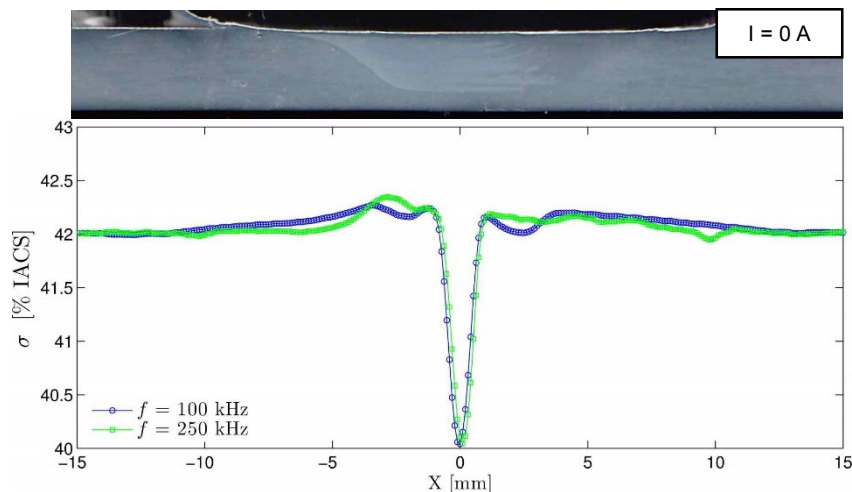


Figura 6.26 – Perfis de condutividade elétrica de M1 do ensaio #3 para duas frequências de sonda diferentes.

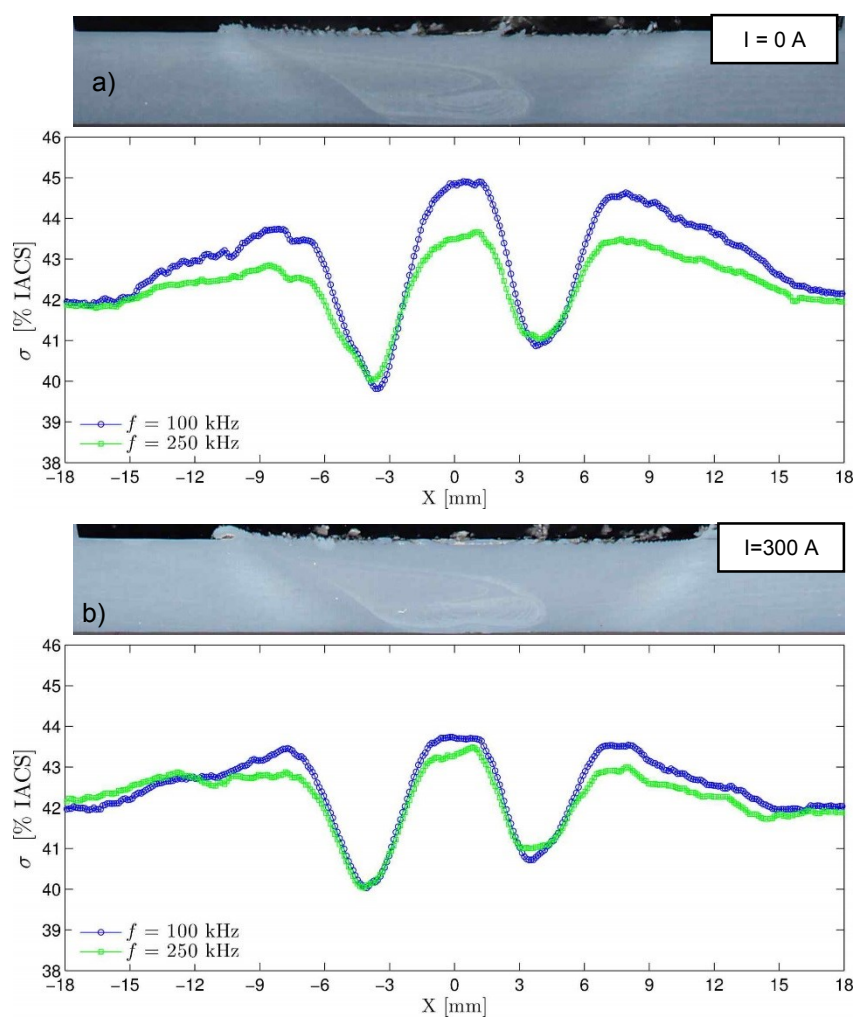


Figura 6.27 – Perfis de condutividade elétrica das amostras M1 (a) e M3 (b), do ensaio #8, para duas frequências diferentes.

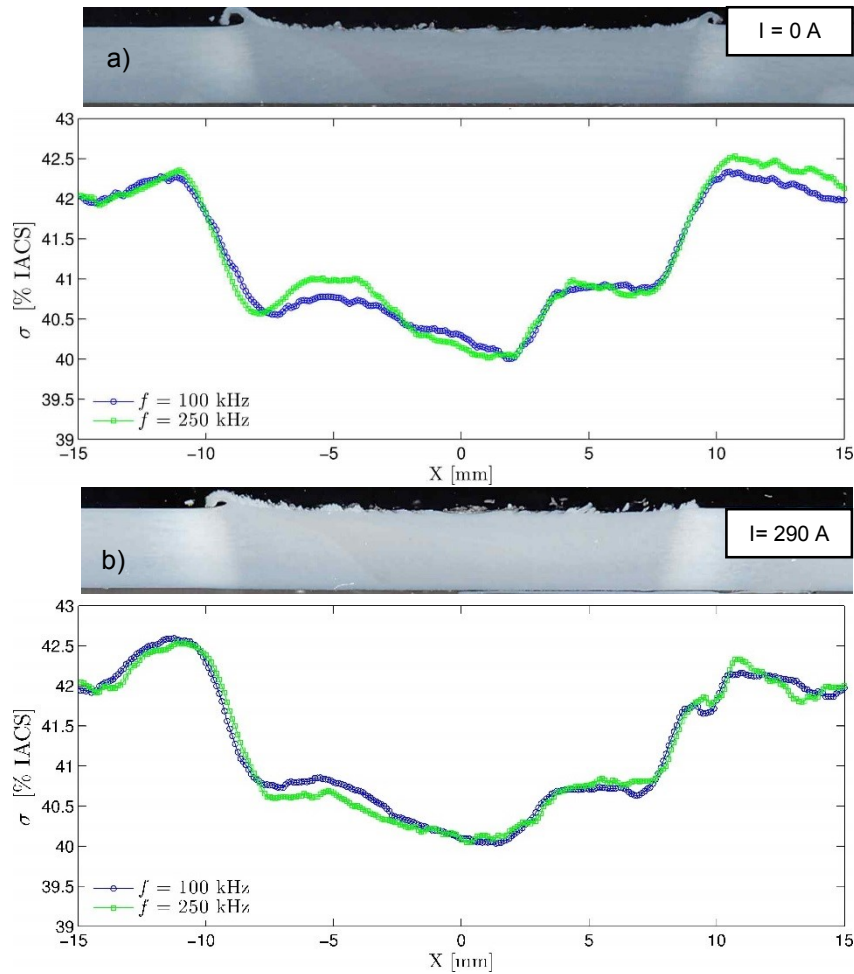


Figura 6.28 – Perfis de condutividade elétrica das amostras M1 (a) e M3 (b), do ensaio #12, para duas frequências diferentes.

## 6.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados e interpretados os ensaios experimentais considerados mais importantes para o trabalho.

Na inspeção visual não foram detetados defeitos relevantes, fora o excesso de rebarba ocasional.

Pela análise metalográfica verificou-se a atenuação de alguns defeitos na raiz, nomeadamente nos ensaios #3, #5 e #10.

Quanto aos ensaios de dureza e medição de corrente, observa-se uma diferença clara entre o ensaio #8 e #12 provocada pela base de soldadura utilizada. Os perfis de dureza e medição de corrente complementam-se, mostrando alta condutividade em zonas de baixa dureza e vice-versa.



---

## 7 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

### 7.1 Conclusões

Pelo trabalho efetuado foi possível extrair as seguintes conclusões:

- 1) O modelo analítico desenvolvido, em comparação com o apresentado em [7,31], considera a o aumento de resistividade elétrica do material causado pelo seu aumento de temperatura e permitiu validar o conceito para 700 A, atingindo temperaturas de 300 a 450 °C.
- 2) As simulações numéricas pelo método dos elementos finitos permitiram entender de que forma circulam as correntes elétricas pelas ferramentas desenvolvidos. Para a AT1, na vertente da base de aço há a maior densidade de corrente de todos os modelos, devido à reduzida área de contacto entre material base e alma de cobre e do caminho percorrido pela corrente, que passa pela raiz para chegar ao cobre encastrado na base. Por estes motivos, o modelo AT1-B1 é o mais favorável à passagem de corrente elétrica na zona da raiz do cordão.
- 3) Quanto à AT2 e AT3, as vertentes que usam a base de mármore apresentam um aumento da densidade de corrente elétrica da ordem de 9% a 40% em comparação com os resultados da vertente da base de aço. Isto deve-se à baixa condutividade elétrica da base de mármore, que força a corrente elétrica a passar pela zona da raiz.
- 4) A utilização de corrente elétrica na SFL mostrou em três dos sete ensaios analisados uma clara redução de espessura dos defeitos de falta de penetração. Isto verificou-se em dois ensaios com a AT1-B1 e um com a AT2-B1. Os ensaios da AT3 não permitiram tirar conclusões quanto à aplicação de corrente elétrica devido à escassez de defeitos.
- 5) Além de se ter verificado a ocorrência de elevado nível de desgaste, após os ensaios nas ferramentas de alumina, a geometria do pino da AT1 provoca o aparecimento de alinhamentos de óxidos, o que classifica a alumina como um material útil apenas na validação do processo.
- 6) Os ensaios de dureza e de medição de condutividade elétrica não evidenciaram diferenças entre amostras de zonas de intensidade de corrente nula e zonas de aplicação de corrente elétrica. Pode-se afirmar que a passagem de corrente não causou efeito nefasto nas amostras analisadas.
- 7) Os ensaios de dureza, medição de condutividade elétrica e a análise metalográfica feitos a amostras do ensaio #12 permitiram observar uma ZTMA maior do que a observada no ensaio #8, que utiliza os mesmos parâmetros. A diferença entre estes dois está na base de mármore utilizada no ensaio #12. É possível que a ZTMA alargada se deva a menores perdas de calor graças ao isolamento proporcionado pela base de mármore.

## 7.2 Desenvolvimentos Futuros

Com os desenvolvimentos processuais atingidos e conhecimentos adquiridos com este trabalho, é proposto para o desenvolvimento futuro:

- 1) Continuar os ensaios com a AT3 com variação de parâmetros, inclusive maior intensidade de corrente, de forma a retirar conclusões desta abordagem.
- 2) Testar amostras soldadas onde o defeito foi mitigado com recurso a ensaios à fadiga.
- 3) Continuar o desenvolvimento de novos protótipos de ferramentas que associem um bom isolamento elétrico a um pino de geometria tradicional de SFL que promova a mistura do material.
- 4) Continuar o desenvolvimento deste processo, com mais foco na base de soldadura de mármore e da sua capacidade de isolar corrente elétrica e evitar perdas de calor do material base atingidas com a utilização da base de aço.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Friction Stir Welding, FSW, Wayne Thomas and Solid state welding at TWI,” [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/technologies/welding-surface-engineering-and-material-processing/friction-stir-welding/>. [Accessed: 09-Feb-2014].
- [2] F. Zhi-hong, Di-qiu He, and W. Hong, “Friction stir welding of aluminum alloys,” *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater Sci Ed*, vol. 19, no. 1, pp. 61–64, Mar. 2004.
- [3] B. T. Gibson, D. H. Lammlein, T. J. Prater, W. R. Longhurst, C. D. Cox, M. C. Ballun, K. J. Dharmaraj, G. E. Cook, and A. M. Strauss, “Friction stir welding: Process, automation, and control,” *J. Manuf. Process*, vol. 16, pp. 56–73, Jan. 2014.
- [4] “Honda Develops New Technology to Weld Together Steel and Aluminum and Achieves World’s First Application to the Frame of a Mass-production Vehicle.” [Online]. Available: <http://world.honda.com/news/2012/4120906Weld-Together-Steel-Aluminum/index.html>. [Accessed: 05-Feb-2014].
- [5] H. J. Liu, J. C. Hou, and H. Guo, “Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy,” *Mater. Des.*, vol. 50, pp. 872–878, Sep. 2013.
- [6] “The use of bobbin tools for friction stir welding of aluminium alloys.” [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-use-of-bobbin-tools-for-friction-stir-welding-of-aluminium-alloys-august-2009/>. [Accessed: 07-Feb-2014].
- [7] H. Costa, “Soldadura por Fricção Linear Assistida por Corrente Eléctrica,” Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [8] K. N. Krishnan, “On the formation of onion rings in friction stir welds,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 327, no. 2, pp. 246–251, Apr. 2002.
- [9] R. S. Mishra and M. W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*. ASM International, 2007.
- [10] R. KEIVANI, B. BAGHERI, F. SHARIFI, M. KETABCHI, and M. ABBASI, “Effects of pin angle and preheating on temperature distribution during friction stir welding operation,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 23, no. 9, pp. 2708–2713, Sep. 2013.
- [11] “Trivex tool for friction stir welding.” [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/news-events/connect/2003/may-june-2003/trivex-tool-for-friction-stir-welding/>. [Accessed: 04-Feb-2014].
- [12] “Novel developments in friction stir welding.” [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/news-events/connect/2002/may-june-2002/novel-developments-in-friction-stir-welding/>. [Accessed: 04-Feb-2014].
- [13] “Skew-stir, variation on a theme.” [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/news-events/connect/2001/july-august-2001/skew-stir-variation-on-a-theme/>. [Accessed: 04-Feb-2014].

- [14] W. A. Ferrando, "The Concept of Electrically Assisted Friction Stir Welding (EAFSW) and Application to the Processing of Various Metals," Survivability, Structures, and Materials Department, Naval Surface Warfare Center Carderock Division, 2008.
- [15] W. M. Zeng, H. L. Wu, and J. Zhang, "EFFECT OF TOOL WEAR ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND ACOUSTIC EMISSION OF FRICTION STIR WELDED 6061 Al ALLOY," *Acta Metall. Sin. Engl. Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 9–19, Feb. 2006.
- [16] J. Q. Li and H. J. Liu, "Effects of tool rotation speed on microstructures and mechanical properties of AA2219-T6 welded by the external non-rotational shoulder assisted friction stir welding," *Mater. Des.*, vol. 43, pp. 299–306, Jan. 2013.
- [17] K. Feldman, G. Kohn, and A. Stern, "Friction Stir Spot Welding." [Online]. Available: [http://www.engineers.org.il/\\_Uploads/3294feldman160107.pdf](http://www.engineers.org.il/_Uploads/3294feldman160107.pdf). [Accessed: 04-Feb-2014].
- [18] Y. F. Sun, J. M. Shen, Y. Morisada, and H. Fujii, "Spot friction stir welding of low carbon steel plates preheated by high frequency induction," *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 450–457, Feb. 2014.
- [19] B. Li, Y. Shen, and W. Hu, "The study on defects in aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple non-destructive testing methods," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 4, pp. 2073–2084, Apr. 2011.
- [20] T. G. Santos, "Ensaio Não Destrutivo por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear," Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, 2009.
- [21] "ISO/DIS 25239-1, Friction stir welding — Aluminium — Part 1: Vocabulary." 20-Apr-2009.
- [22] C. Zhou, X. Yang, and G. Luan, "Effect of oxide array on the fatigue property of friction stir welds," *Scr. Mater.*, vol. 54, no. 8, pp. 1515–1520, Apr. 2006.
- [23] Y. S. Sato, H. Takauchi, S. H. C. Park, and H. Kokawa, "Characteristics of the kissing-bond in friction stir welded Al alloy 1050," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 405, no. 1–2, pp. 333–338, Sep. 2005.
- [24] C. Zhou, X. Yang, and G. Luan, "Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 418, no. 1–2, pp. 155–160, Feb. 2006.
- [25] P. J. Shull, *Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Applications*. Marcel Dekker, CRC Press, 2001.
- [26] T. G. Santos, P. Vilaça, and R. M. Miranda, "Electrical conductivity field analysis for evaluation of FSW joints in AA6013 and AA7075 alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, no. 211, 2011.
- [27] L. S. Rosado, T. G. Santos, M. Piedade, P. M. Ramos, and P. Vilaça, "Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals," *Measurement*, no. 43, 2010.
- [28] X. Long and S. K. Khanna, "Modelling of electrically enhanced friction stir welding process using finite element method," *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2005.
- [29] J. Luo, F. Li, and W. Chen, "Experimental researches on resistance heat aided friction stir welding of Mg alloy," *Q. J. Jpn. Weld. Soc.*, vol. 31, 2013.



- [30] J. Luo, X. J. Wang, and J. X. Wang, "New Technological methods and designs of stir head in resistance friction stir welding," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 14, no. 7, 2009.
- [31] T. G. Santos, R. M. Miranda, and P. Vilaça, "Friction Stir Welding assisted by electrical Joule effect," *J. Mater. Process. Technol.*, no. 214, 2014.
- [32] J. Luo, W. Chen, and G. Fu, "Hybrid-heat effects on electrical-current aided friction stir welding of steel, and Al and Mg alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 12, pp. 3002–3012, Dec. 2014.
- [33] "MatWeb." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/>. [Accessed: 05-Feb-2014].



# ANEXOS

## A.1 Dispersão de corrente elétrica nos modelos numéricos

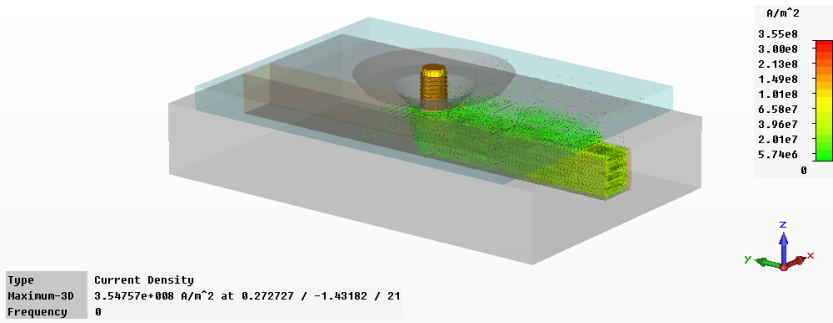


Figura A.0.1 – Distribuição da corrente elétrica em AT1-B1.

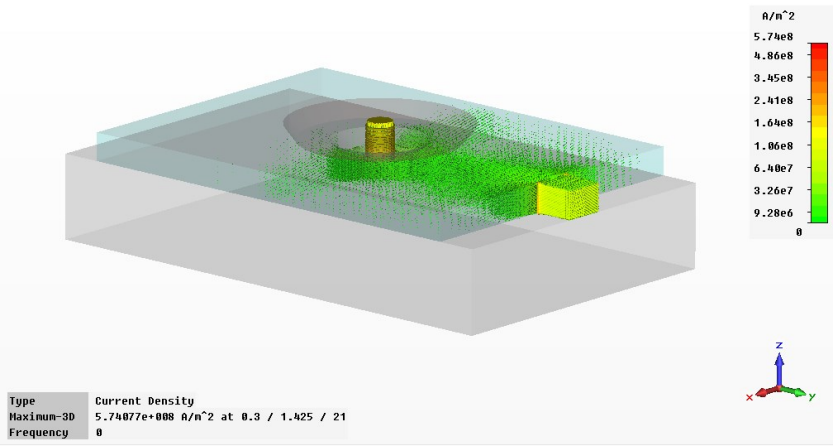


Figura A.0.2 – Distribuição da corrente elétrica em AT1-B2.

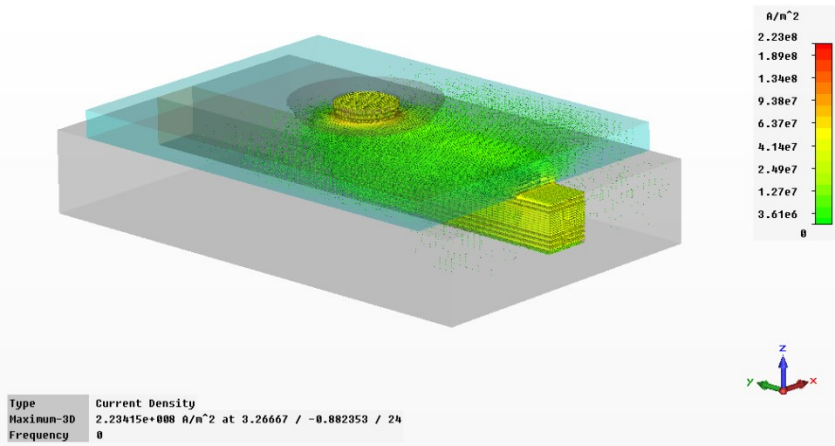


Figura A.0.3 – Distribuição da Corrente Elétrica do modelo AT2-B1.

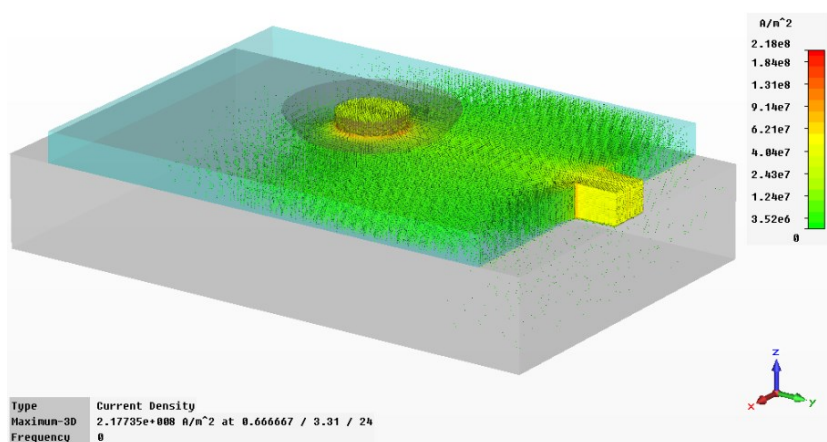


Figura A.0.4 – Distribuição da corrente elétrica em AT2-B2.

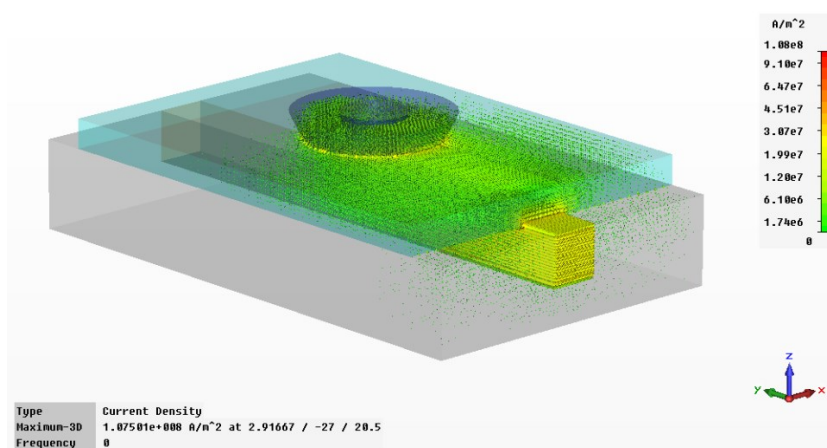


Figura A.0.5 – Distribuição da corrente elétrica em AT3-B1.

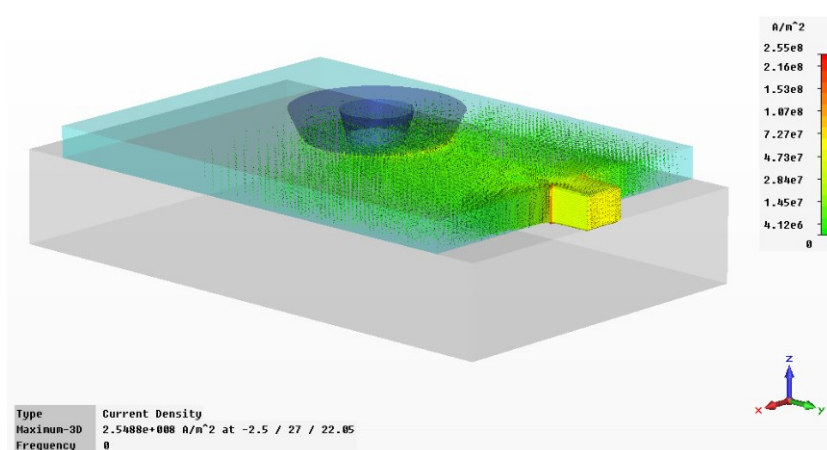


Figura A.0.6 – Distribuição da corrente elétrica em AT3-B2.